

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**

**Univerzitní studijní programy**

**Sestavení funkční koncepce a vývoj aplikačního software  
elektronického systému pohonu 4x4 elektromobilu Democar**

**Assembling of Functional Conception and Development of the  
Application Software for 4WD Powertrain Electronics System  
of the Electric Vehicle Democar**

Student:

Bc. Ondřej Wolf

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Šimoník, Ph.D.

Ostrava 2016

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Ondřej Wolf**

Studijní program:

N3943 Mechatronika

Studijní obor:

3906T007 Automobilová elektronika

Téma:

Sestavení funkční koncepce a vývoj aplikačního software elektronického systému pohonu 4x4 elektromobilu Democar  
Assembling of Functional Conception and Development of the Application Software for 4WD Powertrain Electronics System of the Electric Vehicle Democar

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te rozbor elektronických systémů vozidla s elektrickým pohonem DemoCar. Rozeberte aktuální koncepci propojení a kooperace elektronický systémů pohonu, brzd, servořízení, osvětlení, centrální elektroniky a energy managementu.
2. Dle instrukcí vedoucího modifikujte stávajících řešení elektrického pohonu vozidla DemoCar 2WD na řešení 4WD, včetně řídicí jednotky.
3. Dle instrukcí vedoucího proved'te vývoj software pro řízení pohonu 4WD.
4. Prakticky aplikujte vyvinutá řešení a experimentálně ověřte jejich funkčnost.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ERJAVEC, J.: Automotive Technology: A Systems Approach, 4th Edition, USA 2004, Thomson Learning, 1401 p., ISBN 1-4018-4831-1
- [2] RIBBENS, B., W.: Understanding Automotive Electronics, Sixth Edition, USA 2003, Elsevier Science, 480 p., ISBN 0-7506-7599-3
- [3] DENTOM, T.: Automotive Technology: Advanced Automotive Fault Diagnosis, 2th Edition, USA 2004, Butterworth-Heinemann Ltd. 2006, 288 p., ISBN 0-7506-6991-8
- [4] Robert Bosch GmbH: Bosch Yellow Jackets Series, Bosch Technical Literature, 1996-2014
- [5] Stockel, W., M., Stockel, T., M., Johanson, Ch.: Auto Diagnosis, Service, and Repair, 7th Edition, Goodheart-Willcox, USA 2003, 1024 p., ISBN 978-1566379106
- [6] Dentom, T.: Automotive Technology: Advanced Automotive Fault Diagnosis, 2th Edition, USA 2004, Butterworth-Heinemann Ltd. 2006, 288 p., ISBN 0-7506-6991-8

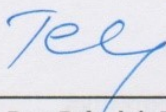


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Šimoník, Ph.D.**

Datum zadání: 20.10.2015

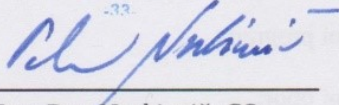
Datum odevzdání: 16.05.2016



---

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry

VYSOKÁ ŠKOLA BAŇSKÁ  
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
708 33 Ostrava - Poruba  
17. listopadu 15/2172  
-33-



---

prof. Ing. Petr Noskiewiç, CSc.  
prorektor pro studium

### **Místopřísežné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Šimoníka, Ph.D. a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 16.5.2016



.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 16.5.2016



.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Ondřej Wolf

Adresa trvalého pobytu autora práce: M. Kopeckého 556/2 Ostrava-Poruba 70800

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Šimoníkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a čas věnovaný při vypracování této práce. Dále chci poděkovat Bc. Samueli Przeczkovi a Bc. Davidu Dulanskému za spolupráci při vývoji spolupracujících systému.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá návrhem aplikačního software elektronického systému pohonu 4x4 elektromobilu Democar. V první části práce jsou popsány elektronické systémy nacházející se na vozidle. Je popsán jejich současný stav a předpoklad jejich budoucího vývoje. Druhá kapitola zahrnuje konstrukci vozidla a uspořádání částí pohonu 4WD. V následující kapitole je obsažen popis navrženého algoritmu řízení pohonu 4WD, včetně diferenciálu a protiprokluzového systému. Byla také navržena a upravena komunikace mezi systémy a požadavky na funkční bezpečnost. V poslední kapitole je ověření navrženého řešení.

## **Klíčová slova**

Elektrický pohon 4WD; měnič; řídicí algoritmus; CAN-bus; řídicí jednotka; C/C++; MQX.

## **Abstract**

Diploma thesis concerns the proposal of software of electronic drive system 4WD of electric vehicle Democar. The first chapter describes car electronic systems. Furthermore their actual state and presumption of future progression. The chapter two covers structure and design of parts of drive 4WD. The following chapter includes description of proposed control algorithm of 4WD, as well as differential and anti-slide system. Communication between systems and safety was proposed and adjusted as well. The last chapter includes proposal solution verification.

## **Key words**

Electric drive 4WD; inverter; control algorithm; CAN-bus; control unit; C/C++; MQX.

## Seznam symbolů a značek

$\alpha$	úhel natočení předního levého kola
$\beta$	úhel natočení předního pravého kola
L	rozvor náprav
D	rozchod kol
$v_{LP}$	rychlost levého předního kola
$v_{PP}$	rychlost pravého předního kola
$v_{PZ}$	rychlost pravého zadního kola
$v_{LZ}$	rychlost levého zadního kola
$r_{PP}$	poloměr otáčení pravého předního kola
$r_{LP}$	poloměr otáčení levého předního kola
$r_{PZ}$	poloměr otáčení pravého zadního kola
$r_{LZ}$	poloměr otáčení levého zadního kola
$\omega_{PP}$	úhlová rychlost pravého předního kola kolem středu otáčení T
$\omega_{LP}$	úhlová rychlost levého předního kola kolem středu otáčení T
$\omega_{PZ}$	úhlová rychlost pravého zadního kola kolem středu otáčení T
$\omega_{LZ}$	úhlová rychlost levého zadního kola kolem středu otáčení T
$k_p$	koeficient rozdílu rychlostí kol na přední nápravě
$k_z$	koeficient rozdílu rychlostí kol na zadní nápravě
$k_{zp}$	koeficient rozdílu rychlostí kol mezi přední a zadní nápravou
$F_z$	síla zatěžující kolo,
$m_v$	hmotnost vozidla,
$M_k$	točivý moment na kole,
$v_x$	rychlost vozidla v podélném směru,
$R_x$	reakční síla,
$F_x$	hnací síla na kole.
e	regulační odchylka
u	akční zásah
$M_w$	požadovaný točivý moment od vysílačky
$M_p$	točivý moment pro přední nápravu
$M_z$	točivý moment pro zadní nápravu
$M_{PP}$	točivý moment pravého předního kola
$M_{LP}$	točivý moment levého předního kola
$M_{PZ}$	točivý moment pravého zadního kola



$M_{LZ}$	točivý moment levého zadního kola
$a_{max}$	maximální zrychlení vozidla
$a_{aktuální}$	aktuální zrychlení vozidla

### **Seznam zkratk**

ŘJ	elektronická řídicí jednotka motoru
RS 485	standart sériové komunikace, sběrnice
CAN	sériová sběrnice
LCU	řídicí jednotka osvětlení
DCU	řídicí jednotka pohonu
CCU	centrální řídicí jednotka
BCU	řídicí jednotka brzd
SCU	řídicí jednotka řízení vozidla
CANopen	komunikační rozhraní sériové sběrnice, vhodné pro řízení měničů
CPU	central processing unit, procesor
RAM	paměť s přímým přístupem, umožňuje zápis i čtení
EEPROM	elektricky mazatelná paměť
LIN	jedno vodičova sběrnice

## Obsah

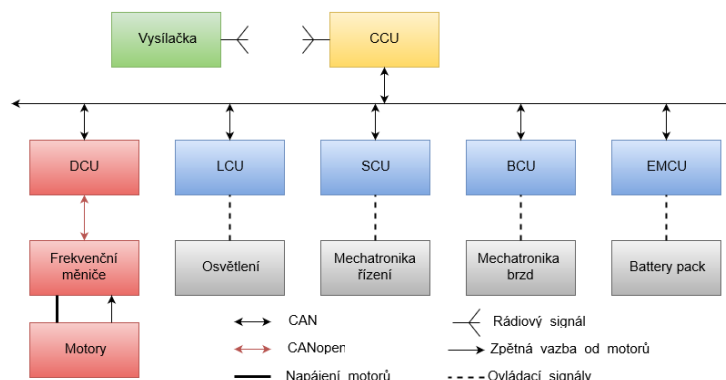
1. Úvod.....	10
2. Rozbor struktury systémů vozidla DEMOCAR .....	11
2.1 Řízení přední nápravy .....	11
2.2 Brzdová soustava .....	12
2.3 Battery-packy.....	12
2.4 Osvětlení vozidla DEMOCAR.....	12
2.5 Pohon vozidla 2WD .....	12
2.5.1 Popis motorů Baumüller DSC 100-S64U10-5.....	13
2.5.2 Popis měniče kmitočtu Baumüller .....	14
2.5.3 Popis řídicí jednotky DCU.....	16
3. Modifikace struktury pohonu na řešení 4WD.....	17
4. Aplikační software pohonu 4WD .....	18
4.1 MQX .....	18
4.2 Základní funkce aplikačního software .....	18
4.3 Algoritmus řízení pohonu .....	20
4.4 Elektronický diferenciál .....	21
4.5 Protiprokluzový systém.....	29
4.6 Vzájemná komunikace a bezpečnost .....	37
5. Ověření vlastností a funkčnosti systémů .....	43
5.1 Ověření funkčnosti pohonu .....	43
5.2 Ověření funkčnosti výpočtu koeficientů pro diferenciál.....	44
5.3 Ověření funkčnosti protiprokluzového systému .....	46
6. Závěr.....	48
7. Seznam použité literatury a zdrojů .....	48

## 1. Úvod

Z hlediska historie se v případě elektrického pohonu vozidel nejedná o nic převratného. První experimenty začali v roce 1880. Na začátku 20. století se jednalo v USA o nejrozšířenější možnost pohonu. Od roku 1912 se začali uplatňovat spalovací motory, protože byl předpoklad neomezených zásob fosilních paliv. V současné době je možno zaznamenat zvyšující se podíl prodáváných elektromobilů napříč celým světem, hlavně z důvodu ekologie ale také díky pokroku ve vývoji baterií a akumulátorů. Ty byly od začátků omezující faktor pro masové rozšíření elektromobilů. Elektromobilita proniká téměř do všech lidských činností a tento trend nepolevuje. I proto vznikl na Vysoké škole Báňské – Technické univerzitě projekt DEMOCAR na kterém jsou aplikovány nejrůznější principy moderních trendů. Výstup řešení projektu – vozidlo s elektrickým pohonem 4WD, ovládané bezdrátovým dálkovým ovladačem, není určen pro běžný provoz, ale je zamýšlen pouze jako možnost praktického uplatnění znalostí studentů oboru Automobilová elektronika a oboru Aplikovaná elektronika. Tato diplomová práce se zabývá vývojem aplikačního software pro pohon vozidla DEMOCAR. Práce zejména řeší způsob řízení synchronních motorů s permanentními magnety skrze ovládání měničů pohonu nadřazenou řídicí jednotkou, komunikaci s ostatními řídicími jednotkami a požadavek na zpracování funkční bezpečnosti celého systému. Spolehlivost a bezpečnost by měla být jednou z hlavních výzev řešeného projektu vývoje DEMOCAR.

## 2. Rozbor struktury systémů vozidla DEMOCAR

Současný stav vozidla DEMOCAR obsahuje funkční řešení pohonu 2WD, systém řízení natáčení kol přední nápravy s využitím servopohonu, battery-packy, systém osvětlení vozidla a systém provizorní brzdy, který je v současné době nahrazován zcela novým řešením. V následujících kapitolách budou stručně popsány jednotlivá řešení a jejich budoucí vývoj. Systémy spolu komunikují po CAN sběrnici, tak jak je vyobrazeno na obrázku 1.



Obr. 1 - Propojení systému na vozidle DEMOCAR

### 2.1 Řízení přední nápravy

Řízení přední nápravy je řešeno pomocí servopohonu. Je využito lineární vedení Kuroda SG3305A-300P se závitovou tyčí s lichoběžníkovým závitem. Toto vedení je poháněno bipolárním krokovým motorkem 5718L-01P, skrze spojku XY25. Hnací moment motoru je 2,08 Nm. Krokový motor je poháněn skrze měnič RMS TECHNOLOGIES R356, který je řízen přes sériovou linku RS-485. Tento mechanismus skrze řídicí tyč ovládá lichoběžník řízení, potažmo natočení kol. Řídicí jednotka dále komunikuje po sběrnici CAN s ostatními jednotkami. Přijímá příkazy pro natočení kol.

Z důvodu nedostatečné dynamiky natáčení kol, nemožnosti sledování polohy natočení kol a poskytování této informace na CAN sběrnici, je v současné době řešena zásadní inovace systému (hardwarová i softwarová). Mechanismus je doplněn posilovačem řízení z vozidla Hyundai i30, který bude řízen pomocí CAN sběrnice v součinnosti se servopohonem.

Dalším stadiem bude vyřešení natáčení zadních kol, kdy se předpokládá použití stejné nebo podobné technologie jako u přední nápravy. [1] [10]

## **2.2 Brzdová soustava**

Původní návrh brzdy byl odstraněn a je vyvíjen zcela nový systém založený na ABS/ESP jednotce. Komunikace s touto jednotkou a celý systém provedení brzd bude popsán dále. [9]

## **2.3 Battery-packy**

Hlavní battery-pack je složen ze 162 Li-Fe-Po<sub>4</sub> článků. Celá soustava má jmenovité napětí 540 V. Články jsou nabíjeny buď přímo ze sítě, popřípadě pokud jsou motory v generátorickém režimu. Každý článek je vybaven balancery, které zajišťují správné nabíjení a vybíjení každého jednotlivého článku. Celá soustava bude řízená X-modulem a pomocí sběrnice CAN komunikovat s ostatními jednotkami, primárně s jednotkou DCU. Celý popis principu vzájemné komunikace bude popsán dále.

Dále se na vozidle nacházejí battery-packy o jmenovitém napětí 12 V a 24 V. [11]

## **2.4 Osvětlení vozidla DEMOCAR**

Vozidlo je vybaveno systémem osvětlení s řídicí jednotkou světel LCU, která osvětlení vozidla řídí. Vozidlo je vybaveno původními, sériovými světlomety čtyřkolky GOES. LCU komunikuje přes CAN sběrnici s ostatními jednotkami, kdy například v případě prudkého brždění dojde k zapnutí výstražných směrových světel. Dále jsou světlomety ovládány vysílačkou skrze hlavní řídicí jednotku CCU.

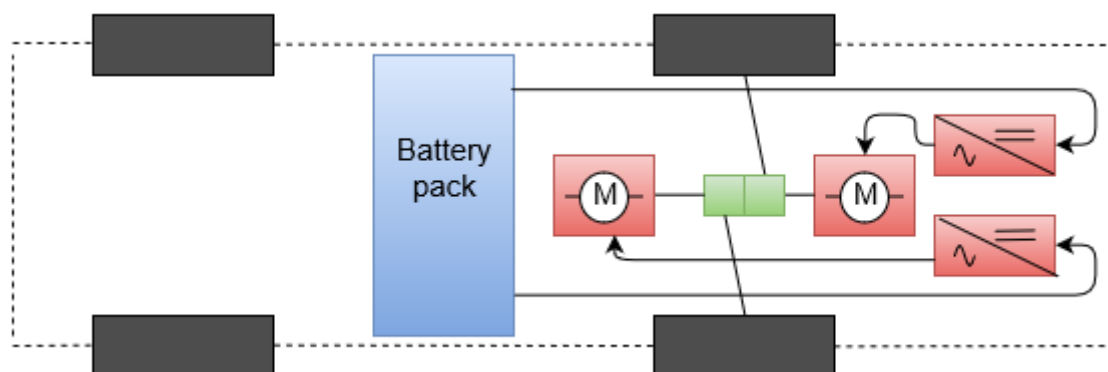
Celý systém osvětlení vozidla včetně LCU již nebude dále vyvíjen a je považován za dokončený, pouze musí být dořešena vzájemná součinnost u systémů, které spolupráci vyžadují.

## **2.5 Pohon vozidla 2WD**

Pohon vozidla je řešen s využitím třífázových synchronních motorů s permanentními magnety Baumüller DSC 100-S64U, které jsou 10-ti pólové. Každý z motorů je řízen frekvenčními měniči Baumüller BM4423-STO-01200-03. Přenos točivého momentu na kola je řešen pomocí převodovek, protože motory jsou v uložení potočeny o 90° oproti osám kol. Dříve byly pro tuto koncepci pohonu 2WD instalovány převodovky s převodovým poměrem 1:1. Pro koncepci 4WD se počítá s využitím převodovek s převodovým poměrem 4:1. Přenos točivého momentu z převodovky na kolo je řešen pomocí poloosy s dvěma homokinetickými klouby. Koncepce uspořádání systému ve vozidle je provedena s ohledem na prostorové možnosti vozidla a také s ohledem na



elektromagnetickou kompatibilitu (EMC). Uložení jednotlivých komponent pohodu vozidla DEMOCAR je zobrazeno na obrázku 2



Obr. 2 - Schéma uložení komponent pohonu vozidla DEMOCAR 2WD

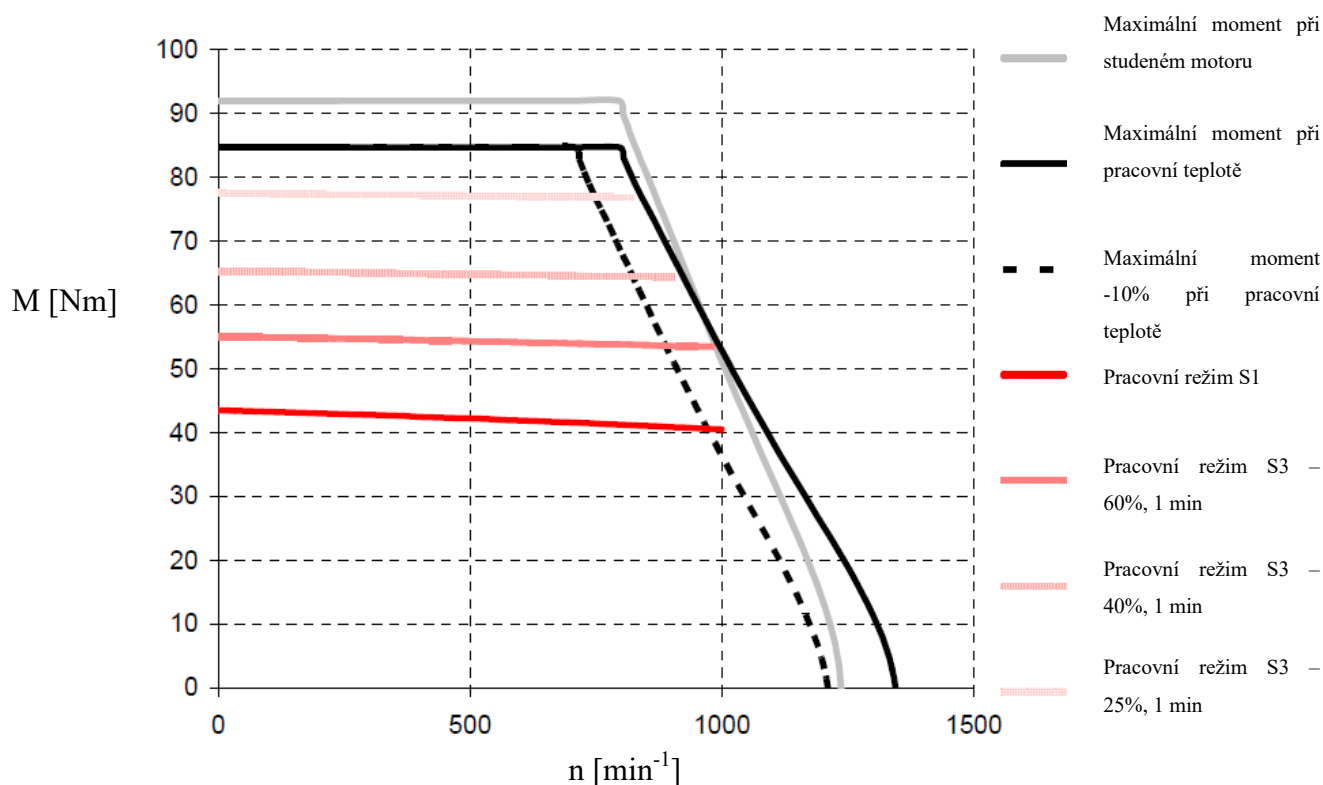
### 2.5.1 Popis motorů Baumüller DSC 100-S64U10-5

Jak již bylo zmíněno, jedná se o 10-ti pólové synchronní motory. Jmenovité napětí je 540 V. Výkon motoru je 4,2 kW a jmenovitý točivý moment je 40,5 Nm. U vozidla DEMOCAR není předpoklad vysoké rychlosti přesto točivý moment motoru, který může být až 84 Nm, v součinnosti s převodovkami, umožní dostatečnou dynamiku vozidla. Další parametry motoru jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1- Popis parametrů motorů určených pro pohon vozidla DEMOCAR [2]

Baumüller DSC 100-S64U10-5		
Parametr	Označení	Hodnota
Jmenovité otáčky	$n_N$	$1000 \text{ min}^{-1}$
Statický moment	$M_o$	43,5 Nm
Statický proud	$I_o$	9,9 A
Maximální statický moment	$M_{omax}$	84 Nm
Maximální statický proud	$I_{omax}$	22,6 A
Jmenovitý výkon	$P_r$	4,2 kW
Jmenovitý moment	$M_r$	40,5 Nm
Jmenovitý proud	$I_r$	9,2 A
Momentová konstanta	$k_{Tr}$	4,4 Nm/A
Jmenovitá frekvence	$f_r$	83,3 Hz
Setrvačnost motoru	$J$	$73,5 \text{ kg/cm}^2$
Hmotnost	$m$	30 kg

Při návrhu řídicí algoritmu je potřeba brát v potaz také pracovní momentové charakteristiky motoru uvedených na obrázku 3.



Obr. 3 - Momentové charakteristiky motoru [2]

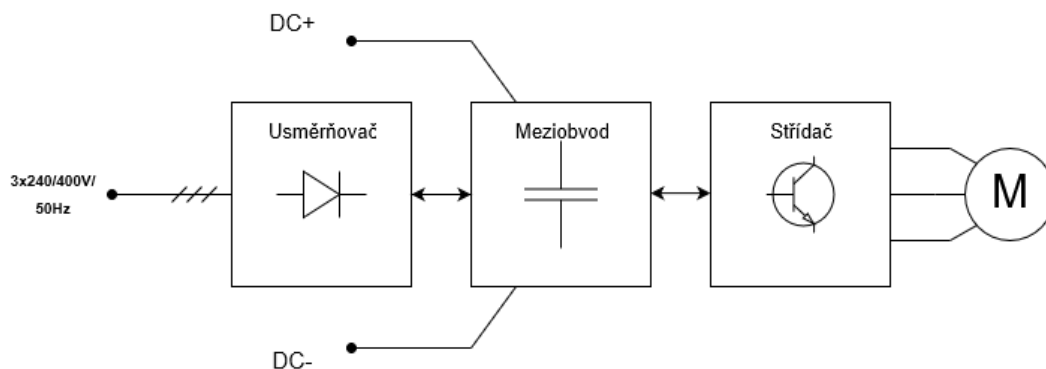
## 2.5.2 Popis měniče kmitočtu Baumüller

Pro řízení motorů se využívá měničů firmy Baumüller b maXX 4423-ST0-01200-03. Jedná se o nepřímý měnič kmitočtu. Je tvořen 6-ti pulzním diodovým usměrňovačem, napěťovým meziobvodem a střídačem. Pro napájení měničů na vozidle se využívá stejnosměrný proud. Tento je přiveden přímo na svorky meziobvodu. Popis parametrů měniče je uveden v tabulce 2.

*Tabulka 2- Popis parametrů měničů [3]*

<b>Baumüller b maXX 4423-ST0-01200-03</b>	
<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Jmenovitý příkon	8,6 kVA
Jmenovitý proud	12,4 A
Činitel harmonického zkreslení vstupního proudu	109 %
Maximální vstupní proud	23,2 A
Jmenovité napětí meziobvodu	540 V
Kapacita meziobvodu	470 $\mu$ F
Doba vybíjení meziobvodu	340 s
Výstupní napětí	3x0 až 370 V
Výstupní frekvence	0 až 450 Hz
Výstupní jmenovitý proud 4 kHz	max. 11,0 A
Výstupní jmenovitý proud 8 kHz	max. 8,0 A
Výstupní špičkový proud 4 kHz	max. 22,0 A
Výstupní špičkový proud 8 kHz	max. 17,6 A
Maximální doba trvání špičkového proudu	60 s
Výkon na svorkách meziobvodu	max. 5,0 kW
Přípustný proud chopper rezistoru	Max 13,0 A
Velikost externího chopper rezistoru	$\geq 60 \Omega$
Spouštěcí napětí chopper rezistoru	780 V
Špičkový výkon chopper rezistoru	10 kW
Přípustný stálý výkon chopper rezistoru	5 kW
Ztrátový výkon na hlavním napájecím napětí	150 W
Ztrátový výkon na řídicím napětí	Max 63 W
Proud řízené brzdy	Max 0,5A

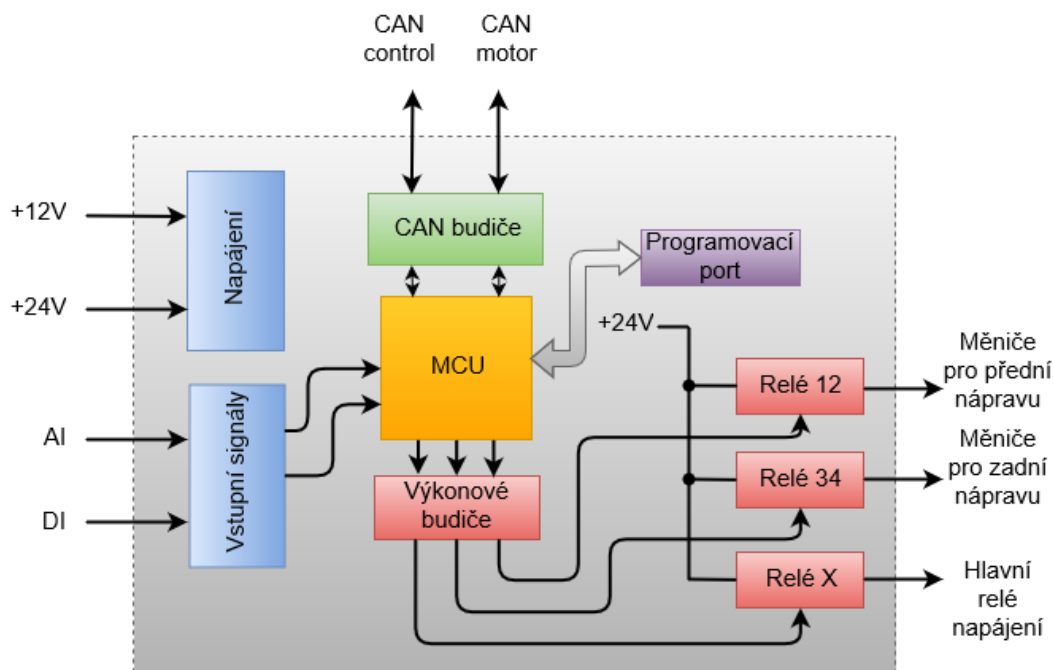
Měniče dále umožňují využití několika zásuvných modulů, které slouží buď pro komunikaci (CANopen), nebo jako digitální nebo analogové vstupy, potažmo výstupy. [3].



Obr. 4 - Blokové schéma měniče Baumüller

### 2.5.3 Popis řídicí jednotky DCU

Základem řídicí jednotky DCU je mikrokontrolér PPC5643L. Mikrokontrolér obsahuje dvoujádrový procesor o taktu 120 MHz. Mikrokontrolér je vhodný pro využití v podmínkách, kde je vyžadována vysoká míra bezpečnosti. Může pracovat v režimu datového komparátoru, popřípadě jako klasický více jádrový procesor. V tomto režimu také pracuje v případě jednotky DCU. Mikrokontrolér je vybaven 1MB flash pamětí a 128 kB interní pamětí. Mezi periferie mikrokontroléru patří min. 16 I/O, je vybaven A/D převodníkem. Mezi periferie pro komunikaci patří 1x FlexRay sběrnice, 2x sběrnice CAN, 2x sběrnice LIN a 3x sběrnice SPI.



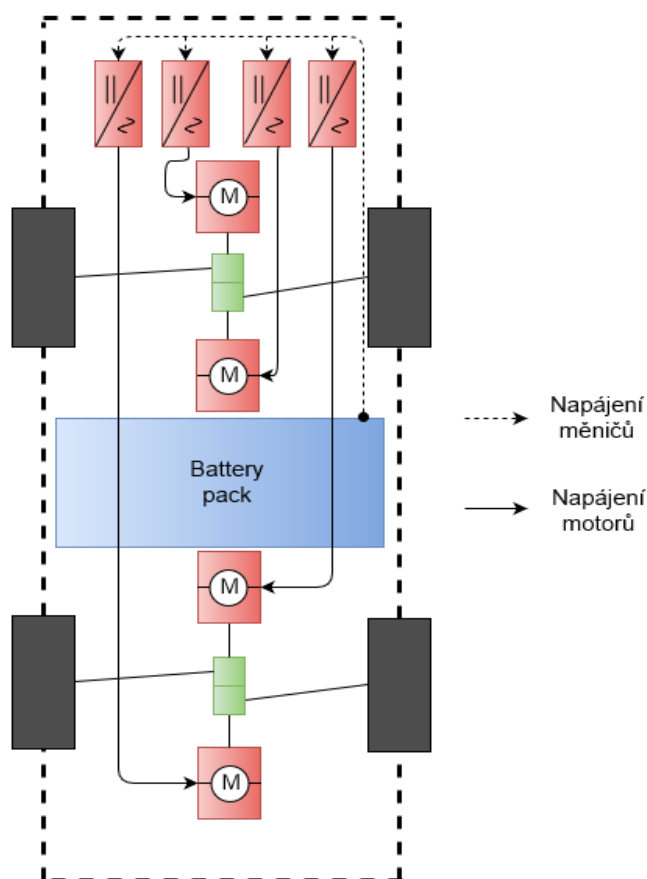
Obr. 5 - Blokové schéma jednotky DCU

Programování jednotky DCU je prováděno skrze rozhraní JTAG. Řídicí jednotka využívá ke komunikaci obě rozhraní pro sběrnici CAN. Výstupní porty ovládají relé, které

slouží pro napájení řídicích částí měničů. Řídicí jednotka v současné době nezpracovává žádné údaje z analogových nebo digitálních vstupů. Toto bude využito v některém z příštích vývojových stupňů vozidla DEMOCAR, například pro vyhodnocení signálu ze snímačů zrychlení. Blokové schéma DCU je uvedeno na obrázku 5. [5] [6]

### 3. Modifikace struktury pohonu na řešení 4WD

Při převzetí práce na vývoji pohonu vozidla DEMOCAR byl vyřešen pohon pouze přední nápravy. Pro modifikaci na řešení pohonu 4WD bylo potřeba zprovoznění dalších dvou měničů. Po zapsání vhodného nastavení do paměti EEPROM a nastavení modulů CAN na správnou komunikační rychlost (1 Mbit/s) a na správnou adresu zařízení, tak jak je uvedeno v příručce [7], bylo možné navázat komunikaci s měniči pomocí CANopen sběrnice. Schéma pohonu 4 WD je na obrázku 6.



Obr. 6 - Koncepce pohonu 4WD

Z battery packu jsou napájeny frekvenční měniče, které jsou uloženy v přední části vozidla. Ty poté ovládají synchronní motory, kdy pro každé kolo je určen jeden motor.



## **4. Aplikační software pohonu 4WD**

Vývoj aplikačního software probíhal v prostředí CodeWarrior s využitím RT (real-time) operačního systému MQX. Struktura software lze rozdělit na část, kde dochází k výpočtům parametrů pro frekvenční měniče a na část, která obsluhuje komunikaci po CAN sběrnici. Dále jsou implementovány prvky funkční bezpečnosti.

### **4.1 MQX**

Jedná se o real-time operační systém, který se skládá z knihoven funkcí. Knihovny funkcí se připojí k samotnému software, který je psán s využitím jazyka C. Knihovny zjednodušují práci programátora, programátor se nemusí zabývat architekturou procesoru a hardwarem obecně. MQX obsahuje jádro schopné obsluhovat více procesů zároveň, preemptivní multitasking, což znamená, že operační systém může vyvolat přepnutí mezi procesy. Dále obsahuje rychlé odezvy na přerušení, synchronizační prostředky, například semaforey a prostředky na správu paměti. Výhodou je velmi nízký požadavek na paměť RAM (pouze desítky kB). MQX nemá požadavek na minimální výkon CPU.

MQX disponuje tzv. RR plánovačem úloh, který přiděluje čas procesům, navíc podle priority. Po vypršení přiděleného času dojde k zastavení procesu, čímž se zamezí tzv. “zamrznutí” procesoru, v případě vzniku chyby ve vykonávání procesu. Tímto je dosažena vysoká bezpečnost použití. [6]

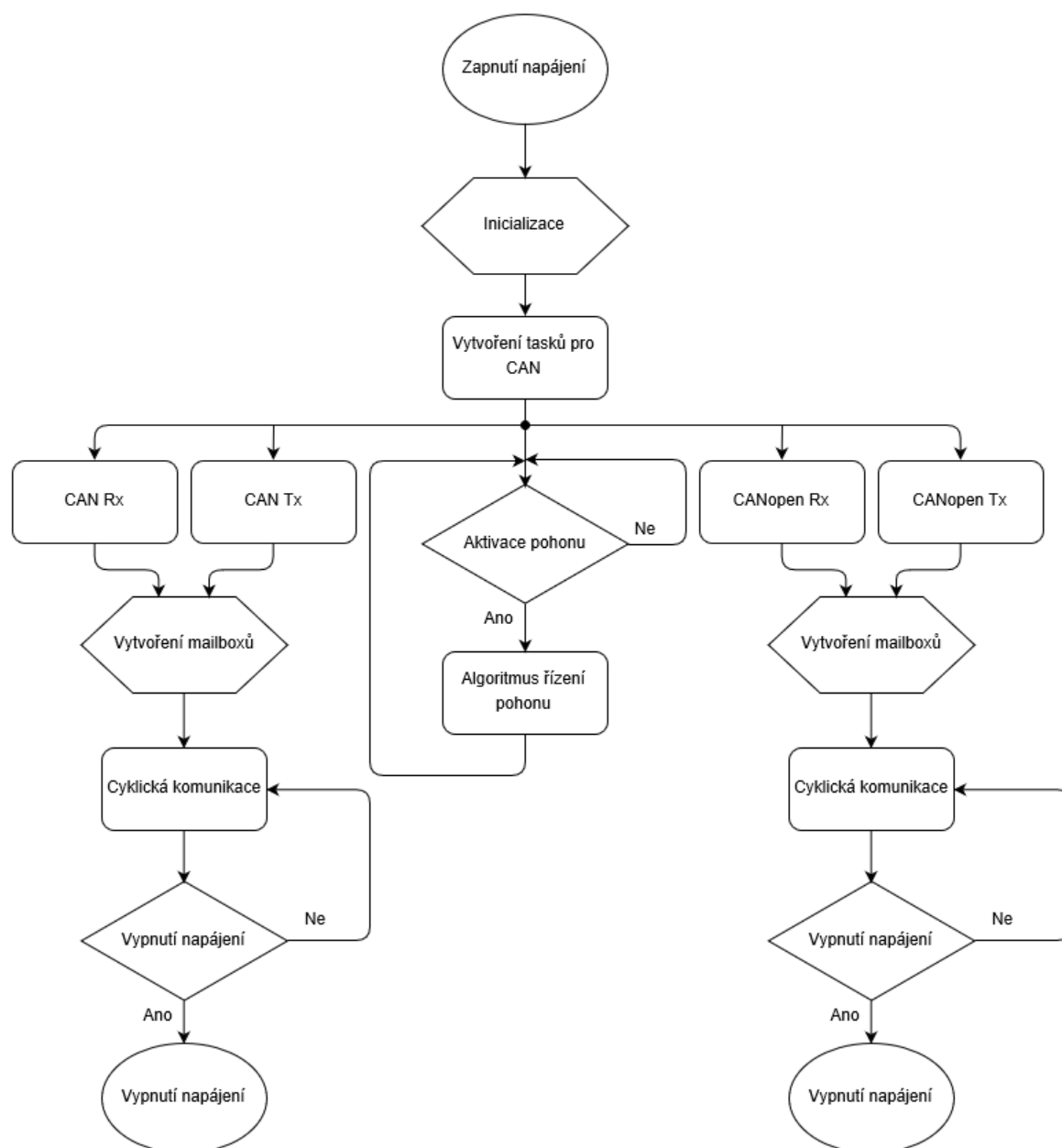
### **4.2 Základní funkce aplikačního software**

Základní struktura programu obsahuje 5 hlavních částí, podle kterých lze program rozdělit. Jedná se o:

- hlavní task – algoritmus řízení pohonu,
- task pro odeslání dat na CAN control,
- task pro přijímání dat z CAN control,
- task pro odesílání dat na CAN motor,
- task pro přijímání dat z CAN motor.

Funkcí hlavního tasku je inicializace programu a vytvoření tasků zbývajících. Dále se aktivuje napájení měničů. V tasku je vnořená cyklická smyčka, která počítá hodnoty parametrů potřebných pro ovládání frekvenčních měničů. Na základě dat přijatých po sběrnici CAN control (požadovaný moment z vysílačky, informace o stavu napětí akumulátoru atp.) a CAN motor (teplota motorů, otáčky výstupní hřídele atp.) se provede korekce parametrů. Tyto parametry jsou následně předány ostatním taskům.

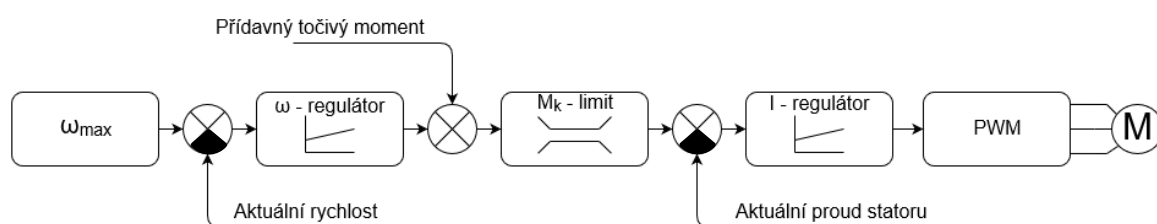
Tasky pro odesílání a přijímání dat fungují pro obě CAN rozhraní stejně. V případě příjmu zprávy je vyvoláno přerušení kdy na základě tohoto přerušení je zpráva přijatá po CANu uzamčená a následně je tato zpráva uložena, v závislosti na identifikátoru zprávy, do proměnné odpovídajícího formátu. Odesílání dat probíhá seřazením dat do příslušného rámce a poté je celá zpráva odeslána s příslušným identifikátorem. Pro odesílání zpráv na CAN control je zvolen identifikátor o hodnotě 150.



Obr. 7 - Vývojový diagram základního běhu programu

### 4.3 Algoritmus řízení pohonu

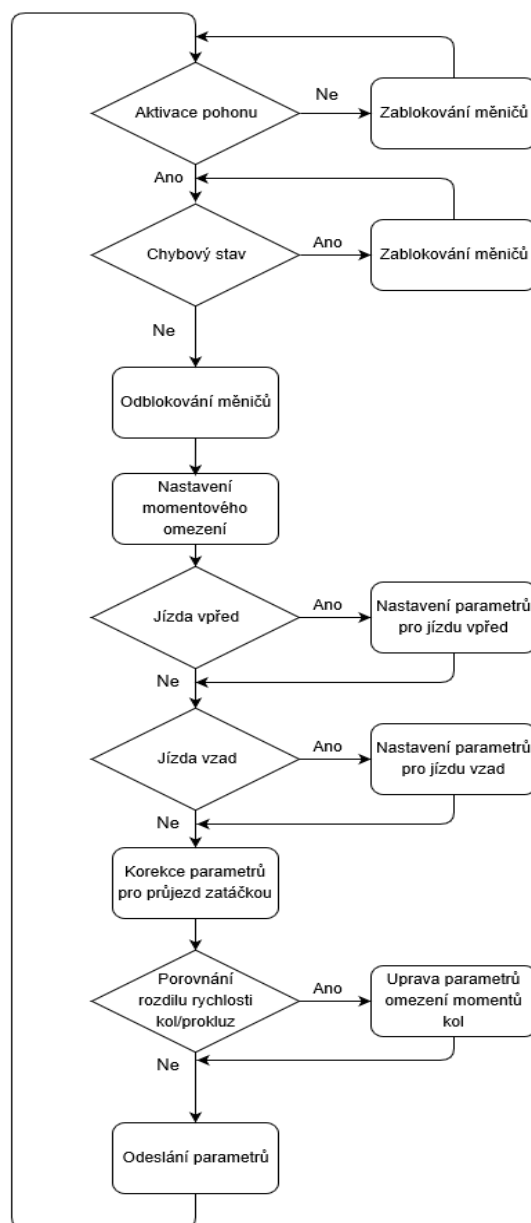
Jedním z hlavních úkolů pro realizaci algoritmu řízení pohonu je stanovit parametry pro ovládání použitých frekvenčních měničů Baumüller. Tyto frekvenční měniče nabízí velké množství parametrů, skrze které dochází k jejich řízení. Proto je důležité stanovit, v jakém režimu budou tyto měniče pracovat. Navržené řešení je využití rychlostní regulace v součinnosti s omezováním momentu motoru. V praxi to znamená, že je nastaven parametr rychlosti pro požadovaný smysl otáčení. Tato rychlost je zároveň i maximální možnou dosažitelnou rychlostí. Dále je nastavován parametr momentového omezení, který je nastaven podle polohy páčky na vysílače. Tento parametr slouží k regulaci rychlosti vozidla podle požadavku řidiče.



Obr. 8 - Blokové schéma řídicích a regulačních obvodů měničů

Popis blokového schématu je na obrázku 8. Na základě této koncepce byl vytvořen algoritmus řízení pohonu. Běh programu začíná ověřením povolení pohonu. Pokud je pohon povolen, jsou aktivovány frekvenční měniče. Poté dochází ke kontrole zpráv z ostatních subsystému, v současné době systému servořízení, systému brzd. Pokud dojde k poruše na jiném systému, řízení pohonu provede adekvátní reakci. Pokud dojde k poruše na jednotce řízení SCU nebo DCU, dojde k deaktivaci měničů.

Dále jsou odblokovány měniče, a na základě polohy ovládací páčky na vysílače je vypočtena velikost točivého momentu, která by měla být přenesena na kola. Dále je určen směr otáčení, potažmo směr pohybu vozidla a jeho maximální rychlost. Parametr maximální rychlosti a točivého momentu se dále nekoriguje za předpokladu, že vozidlo nezatačí a je dostatečná přilnavost pneumatik. V případě, že vozidlo projíždí zatáčkou, dojde k úpravě parametru maximální rychlosti a to z důvodu rozdílné rychlosti jednotlivých kol při průjezdu zatáčkou. Toto bude detailněji popsáno v následujících kapitolách. Dále je omezena rychlost v případě, že dojde k natočení kol o více než  $25^\circ$ , dojde ke snížení maximální rychlosti o polovinu z důvodu stability vozidla. Tyto parametry byly stanoveny pouze dočasně pro demonstraci vzájemné komunikace mezi jednotkami a později budou stanoveny s ohledem na dynamiku vozidla.



Obr. 9 - Vývojový diagram hlavní části programu

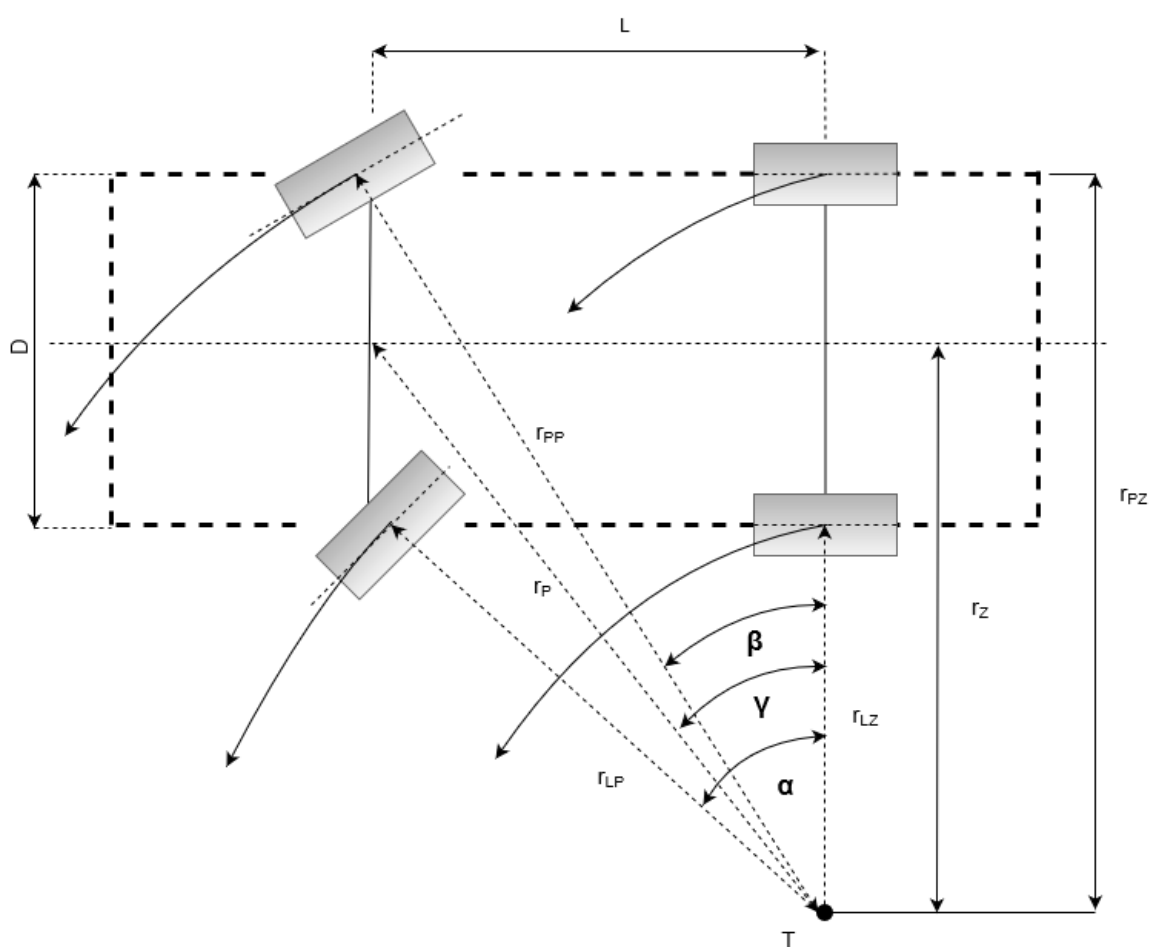
Poslední korekce parametru je úprava točivého momentu v případě detekce prokluzu některého z kol. Pokud je detekován prokluz, je omezen točivý moment na prokluzujícím kole. V případě že dojde k prokluzu všech kol, dojde k omezení momentu na základě vypočteného maximálního možného zrychlení. Toto bude detailněji popsáno v následujících kapitolách.

#### 4.4 Elektronický diferenciál

Důvod pro navržení elektronického diferenciálu je skutečnost, že při průjezdu zatáčkou je rychlost jednotlivých kol rozdílná, protože každé kolo se pohybuje po rozdílné

dráze. Z tohoto důvodu byl navržen diferenciál, který na základě natočení přední řídicí nápravy vypočítává rychlosti jednotlivých kol. Tyto rychlosti jsou použity v případě, že dojde k překročení maximální rychlosti, nebo v případě, že dojde k prokluzu kol. [13]

Průjezd zatáčkou je zobrazen na obrázku 10. Pro návrh algoritmu simulující diferenciál bylo potřeba jiného přístupu, než při návrhu mechanického diferenciálu ve vozidle. Byly stanoveny koeficienty, které upravují vzájemnou rychlost kol. Jak je patrné z obrázku 10, přední vnější kolo jede vždy po nejdelší dráze. Toto kolo se pohybuje vždy původní požadovanou rychlostí. Rychlosti ostatních kol jsou sníženy vynásobením koeficienty, které jsou závislé na úhlu natočení kol řídicí nápravy.



Obr. 10- Průjezd vozidla zatáčkou

Koeficienty byly stanoveny pomocí goniometrických funkcí. Skrze CAN sběrnici je zjištěn úhel natočení vnitřního kola. Jak vyplývá z obrázku 10, je úhel natočení tohoto kola větší než kola vnějšího. Toto je dáno lichoběžníkovou konstrukcí řízení. Vozidlo projíždějící zatáčkou musí mít jeden bod otáčení T. Úhel  $\beta$  je vypočítán pomocí následujícího vztahu.



$$\beta = \operatorname{atan}\left(\frac{L}{\frac{L}{\tan(\alpha)} + D}\right) \quad (1)$$

Kde:

$\alpha$  ... úhel natočení předního levého kola,

$\beta$  ... úhel natočení předního pravého kola,

$L$  ... rozvor náprav,

$D$  ... rozchod kol.

Výpočet koeficientů vychází z předpokladu kdy úhlová rychlost vozidla kolem bodu T je stejná, pro všechny body nacházející se na vozidle. Pro kola přední nápravy tedy platí, že:

$$\omega_{PP} = \omega_{LP} \quad (2)$$

Kde:

$\omega_{PP}$  ... úhlová rychlost pravého předního kola kolem středu otáčení T,

$\omega_{LP}$  ... úhlová rychlost levého předního kola kolem středu otáčení T.

Potom platí, že:

$$\frac{v_{PP}}{r_{PP}} = \frac{v_{LP}}{r_{LP}} \quad (3)$$

Kde:

$v_{PP}$  ... rychlost pravého předního kola,

$v_{LP}$  ... rychlost levého předního kola,

$r_{PP}$  ... poloměr otáčení pravého předního kola,

$r_{LP}$  ... poloměr otáčení levého předního kola.

$$v_{LP} = v_{PP} \cdot \frac{r_{LP}}{r_{PP}} \quad (4)$$

Po dosazení za poloměry otáčení jednotlivých kol, získáme:

$$v_{LP} = v_{PP} \cdot \frac{\frac{L}{\sin \alpha}}{\frac{L}{\sin \beta}} \quad (5)$$

$$v_{LP} = v_{PP} \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \quad (6)$$

Odsud získáme koeficient pro přepočet rychlosti kol na přední nápravě.

$$k_P = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \quad (7)$$

Podobně lze získat koeficient  $k_z$  pro přepočet rychlostí na zadní nápravě.

$$\omega_{PZ} = \omega_{LZ} \quad (8)$$

Kde:

$\omega_{PZ}$  ... úhlová rychlost pravého zadního kola kolem středu otáčení T,

$\omega_{LZ}$  ... úhlová rychlost levého zadního kola kolem středu otáčení T.

Dále platí podobná závislost jako pro přední kola:

$$\frac{v_{PZ}}{r_{PZ}} = \frac{v_{LZ}}{r_{LZ}} \quad (9)$$

Kde:

$v_{PZ}$  ... rychlost pravého zadního kola,

$v_{LZ}$  ... rychlost levého zadního kola,

$r_{PZ}$  ... poloměr otáčení pravého zadního kola,

$r_{LZ}$  ... poloměr otáčení levého zadního kola.

$$v_{PZ} = v_{LZ} \cdot \frac{r_{PZ}}{r_{LZ}} \quad (10)$$

Po dosazení za poloměry otáčení jednotlivých kol, je získáno:

$$v_{PZ} = v_{LZ} \cdot \frac{\frac{L}{\tan \alpha}}{\frac{L}{\tan \beta}} \quad (11)$$

$$v_{PZ} = v_{LZ} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} \quad (12)$$

Odsud získáme koeficient pro přepočítání rychlosti kol na zadní nápravě.

$$k_Z = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} \quad (13)$$

Pro přepočítání koeficientů rozdílu rychlosti mezi zadní a přední nápravou se počítá pouze koeficient rozdílu rychlostí kol na vnější straně vozidla při průjezdu zatáčkou.

$$\omega_{PP} = \omega_{PZ} \quad (14)$$

Kde:

$\omega_P$  ... úhlová rychlost pravého předního kola kolem středu otáčení T,

$\omega_Z$  ... úhlová rychlost pravého zadního kola kolem středu otáčení T.

$$\frac{v_{PP}}{r_{PP}} = \frac{v_{PZ}}{r_{PZ}} \quad (15)$$

Kde:

$v_{PP}$  ... rychlost pravého předního kola,

$v_{PZ}$  ... rychlost pravého zadního kola,

$r_{PP}$  ... poloměr otáčení pravého předního kola,

$r_{PZ}$  ... poloměr otáčení pravého zadního kola.

$$v_{PZ} = v_{PP} \cdot \frac{r_{PZ}}{r_{PP}} \quad (16)$$

Po dosazení za poloměry otáčení jednotlivých kol, získáme:

$$v_{PZ} = v_{PP} \cdot \frac{\frac{L}{\tan \beta}}{\frac{L}{\sin \beta}} \quad (17)$$

$$v_{PZ} = v_{PP} \cdot \frac{\sin \beta}{\tan \beta} \quad (18)$$

Odsud získáme koeficient pro přepočet rychlosti kol mezi zadní a přední nápravou.

$$k_{ZP} = \frac{\sin \beta}{\tan \beta} \quad (19)$$

Tyto výše vypočítané koeficienty jsou využity pro přepočet rychlostí jednotlivých kol při jízdě vozidla vlevo. Podobné odvezení a výpočty jsou prováděny také při jízdě vpravo. Rozdíl je velikost uhlu natáčených kol. Při jízdě vlevo je větší úhel  $\alpha$  při jízdě vpravo je potom větší úhel  $\beta$ . Informace od řízení je vždycky úhel větší, proto při jízdě vpravo je potřeba pozměnit výpočty. Proto je potřeba vypočítat menší úhel, podle následujícího vztahu:

$$\alpha = \operatorname{atan} \left( \frac{L}{\frac{L}{\tan(\beta)} + D} \right) \quad (20)$$

Kde:

$\alpha$  ... úhel natočení předního levého kola,

$\beta$  ... úhel natočení předního pravého kola,

$L$  ... rozvor náprav,

$D$  ... rozchod kol.

Dále se vychází ze stejného předpokladu, podle vztahu (2). Tento vztah je dále upraven do podoby kdy:

$$v_{PP} = v_{LP} \cdot \frac{r_{PP}}{r_{LP}} \quad (21)$$

Kde:

$v_{PP}$  ... rychlost pravého předního kola,

$v_{LP}$  ... rychlost levého předního kola,

$r_{PP}$  ... poloměr otáčení pravého předního kola,

$r_{LP}$  ... poloměr otáčení levého předního kola.

Po dosazení a úpravě výrazu, je získáno:

$$v_{PP} = v_{LP} \cdot \frac{\frac{L}{\sin \beta}}{\frac{L}{\sin \alpha}} \quad (22)$$

$$v_{PP} = v_{LP} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (23)$$

Je získán koeficient pro přepočet rychlosti kol na přední nápravě při natočení kol doprava. (1)

$$k_P = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (24)$$

Podobný postup je aplikován také pro výpočet koeficientu rozdílu rychlosti na zadní nápravě kde se vychází ze vztahu (8). Po úpravě a dosazení je získáno:

$$v_{LZ} = v_{PZ} \cdot \frac{r_{LZ}}{r_{PZ}} \quad (25)$$

Kde:

$v_{PZ}$  ... rychlost pravého zadního kola,

$v_{LZ}$  ... rychlost levého zadního kola,

$r_{PZ}$  ... poloměr otáčení pravého zadního kola,

$r_{LZ}$  ... poloměr otáčení levého zadního kola.

Po dosazení za poloměry otáčení jednotlivých kol, je získáno:

$$v_{LZ} = v_{PZ} \cdot \frac{\frac{L}{\tan \beta}}{\frac{L}{\tan \alpha}} \quad (26)$$

$$v_{PZ} = v_{LZ} \cdot \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} \quad (27)$$

Odsud je získán koeficient pro přepočet rychlosti kol na zadní nápravě při natočení kol doprava.

$$k_z = \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} \quad (28)$$

V případě výpočtu koeficientu rozdílu rychlosti mezi zadní a přední nápravou se vychází z rozdílu rychlosti kol na vnější straně vozidla.

$$\omega_{LP} = \omega_{LZ} \quad (29)$$

Kde:

$\omega_{LP}$  ... úhlová rychlost levého předního kola kolem středu otáčení T,

$\omega_{LZ}$  ... úhlová rychlost levého zadního kola kolem středu otáčení T.

$$\frac{v_{LP}}{r_{LP}} = \frac{v_{LZ}}{r_{LZ}} \quad (30)$$

Kde:

$v_{LP}$  ... rychlost pravého předního kola,

$v_{LZ}$  ... rychlost pravého zadního kola,

$r_{LP}$  ... poloměr otáčení pravého předního kola,

$r_{LZ}$  ... poloměr otáčení pravého zadního kola.

$$v_{LZ} = v_{LP} \cdot \frac{r_{LZ}}{r_{LP}} \quad (31)$$

Po dosazení za poloměry otáčení jednotlivých kol, získáme:

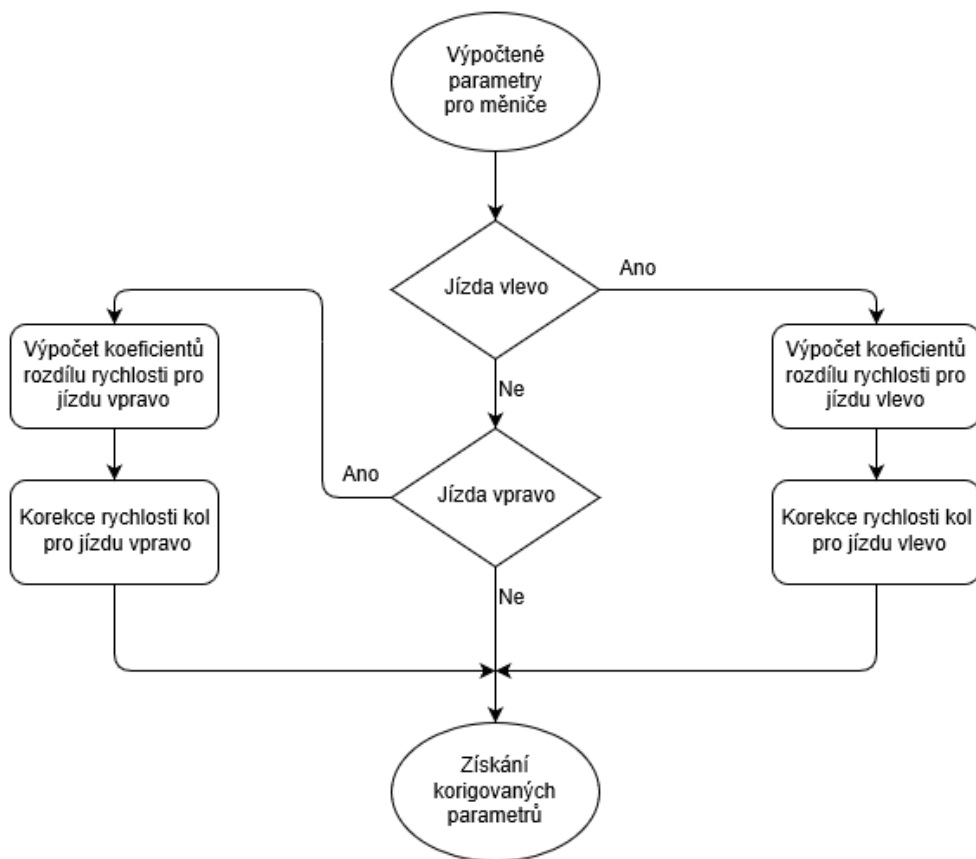
$$v_{LZ} = v_{LP} \cdot \frac{\frac{L}{\tan \alpha}}{\frac{L}{\sin \alpha}} \quad (32)$$

$$v_{LZ} = v_{LP} \cdot \frac{\sin \alpha}{\tan \alpha} \quad (33)$$

Odsud získáme koeficient pro přepočítání rychlosti kol mezi zadní a přední nápravou.

$$k_{zP} = \frac{\sin \alpha}{\tan \alpha} \quad (34)$$

Postup výpočtu ve zdrojovém kódu je znázorněn na obrázku 11. V závislosti na natočení kol je vybrán výpočet pro jízdu vpravo, vlevo popřípadě parametry nemusí být upravovány, pokud jede vozidlo v přímém směru. Po zvolení příslušného výpočtu a jeho provedení se parametry předávají do další částí kódu, která je dále zpracovává tak, jak je popsáno dále.



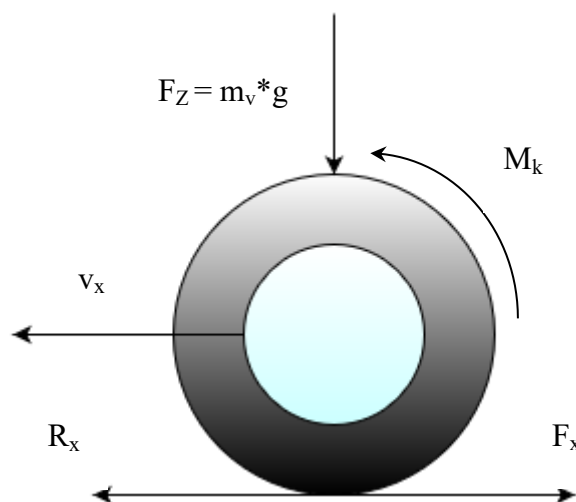
Obr. 11 - Vývojový diagram výpočtu parametrů diferenciálu

Parametry maximální rychlosti jsou vynásobeny vypočtenými koeficienty a odeslány na CAN sběrnici. Hodnoty okamžité rychlosti jsou také násobeny těmito parametry, aby v případě prokluzu kol bylo možné vytvářet odpovídající akční zásahy systémem eliminující prokluz kol.

#### 4.5 Protiprokluzový systém

Funkce tohoto systému zabráňuje protočení kol v případě, že by došlo ke ztrátě adheze, odlehčení kola, nebo by došlo ke ztrátě kontaktu kola s podložkou v případě průjezdu terénem. Síly působící na kolo jsou zobrazena na obrázku 12.





Obr. 12- Přenos sil na podložku

Kde:

$F_Z$  ... síla zatěžující kolo,

$m_v$  ... hmotnost vozidla,

$M_k$  ... točivý moment na kole,

$v_x$  ... rychlost vozidla v podélném směru,

$R_x$  ... reakční síla,

$F_x$  ... hnací síla na kole.

V případě, že hnací síla na kole je stejná jako síla reakční dochází k přenosu točivého momentu a hnací síly na vozovku a vozidlo se může pohybovat. Pokud je povrch vozovky méně kvalitní popřípadě síla, která se má přenést by byla příliš velká, dochází k prokluzu kola. Maximální velikost reakční síly je dána zatížením kola, to znamená hmotnosti vozidla a součinitelem tření mezi vozovkou a kolem. Tento součinitel je závislý na kvalitě materiálu pneumatiky a na profilu dezénu pneumatiky, dále pak na kvalitě a stavu vozovky, kde se má síla přenést. [7]

V případě prokluzu proto platí, že

$$F_x > R_x \quad (35)$$

Aby kolo neprokluzovalo, což může mít vliv také na směrovou stabilitu kola, je potřeba snížit hnací moment na kole, potažmo snížit hnací sílu na obvodu kola. Další z požadavku na zabránění prokluzu kola je ochrana před poškozením samotného systému.

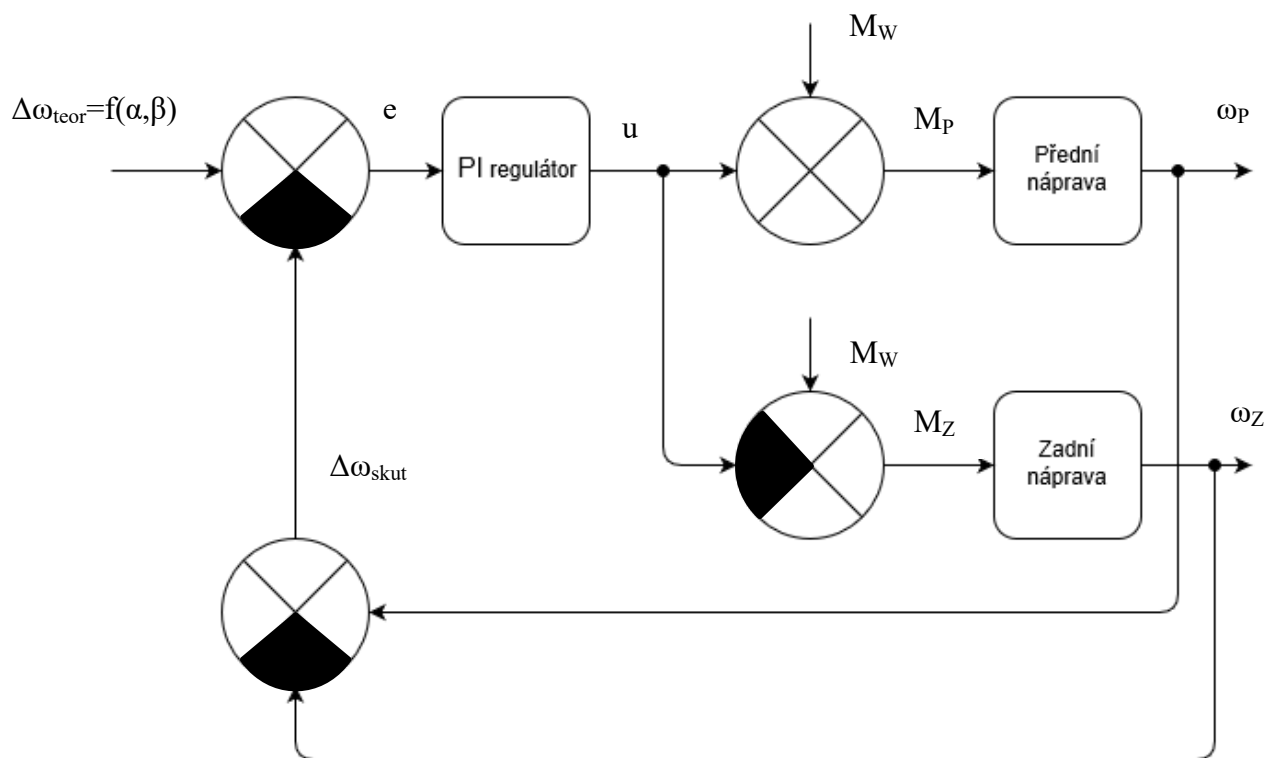
Při prokluzu může dojít ke zvýšení otáček nad mez maximálních povolených otáček motorů, což způsobí poškození motorů atp.

Celý princip protiprokluzového systému se skládá ze dvou hlavních částí. První část vychází z předpokladu, že jsou sledovány otáčky všech kol a pokud je detekován nárůst otáček na jednom nebo více kolech, přičemž točivý moment a tím i hnací síla je stejná, je předpoklad, že tyto kola prokluzují a dojde k omezení točivého momentu na těchto kolech. Pokud by byly podmínky pro přenos hnacích sil stejné, rychlost kol musí být stejná. Toto platí pouze za předpokladu, kdy vozidlo jede v přímém směru. Pokud vozidlo jede zatáčkou, tak jsou rychlosti jednotlivých kol různé, což neznamena, že by některé z kol ztratilo adhezi. Proto je potřeba rychlosti kol přepočítat pomocí koeficientů rozdílů rychlostí kol, jejichž výpočet je v předchozí kapitole, a následně regulovat moment na kolech skrze tuto přepočtenou rychlost.

Velikost regulačního zásahu na kolech je určena pomocí PI regulátorů. Celý systém se skládá ze tří regulátorů, kdy každý vypočítává regulační zásah pro jinou skupinu kol tak aby byla zajištěna stabilita vozidla pro jízdu na různých typech povrchů.

První, hlavní regulátor porovnává průměrné rychlosti kol na přední nápravě a průměrné rychlosti kol zadní nápravě. Rozdílem mezi průměrnou rychlostí kol přední nápravy a průměrnou rychlostí kol zadní nápravy vzniká odchylka od požadované hodnoty. Požadovaná hodnota je nulový rozdíl rychlostí mezi průměrnou rychlostí přední a zadní nápravy. Po odečtení vzniká regulační odchylka, která vstupuje do samotného regulátoru, kde je upravena proporcionální a integrační složka.

Tento akční zásah je odečítán od velikosti distribuovaného momentu, který je určen pro nápravu, na které jedno nebo obě kola ztratila přilnavost. Stejná velikost akčního zásahu je připočtena k velikosti momentu distribuovaného na nápravu, na které nedochází k prokluzu kol. Takovým to rozdělením je dosaženo přenosu požadovaného hnacího momentu řidičem, na vozovku za teoreticky jakýchkoli okolností. Princip a regulační schéma je na obrázku 13.

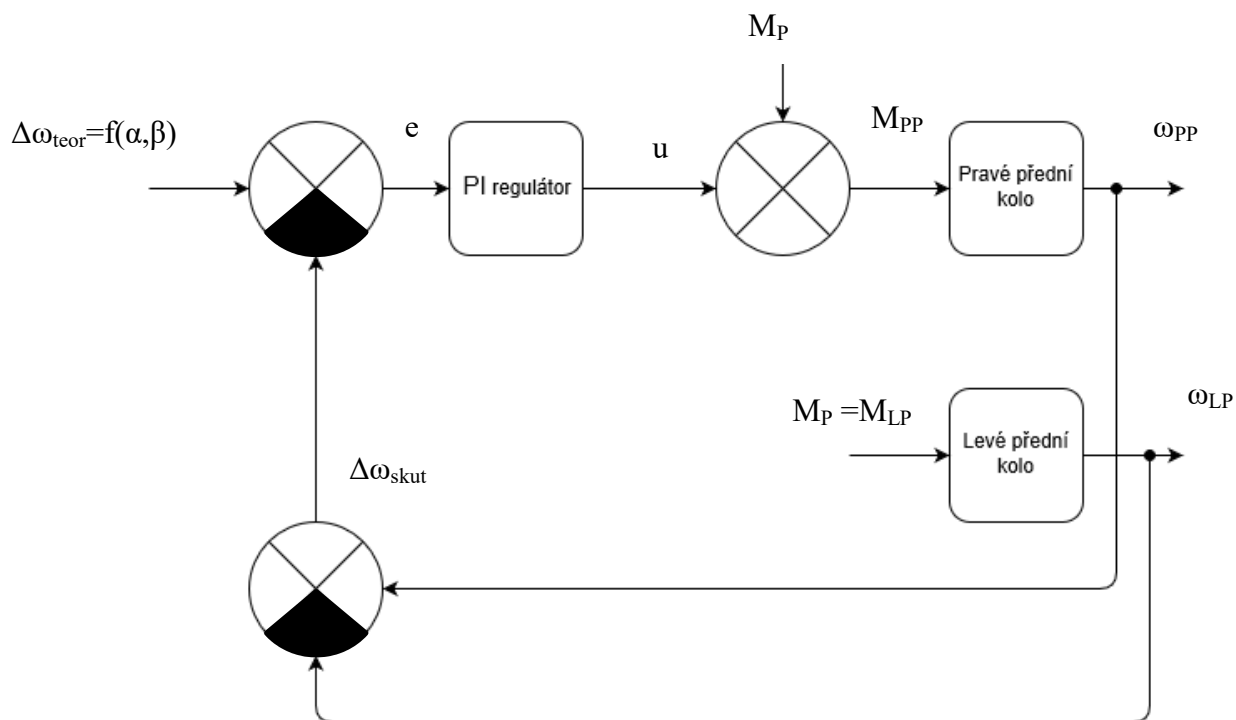


Obr. 13 - Mezinápravový regulátor prokluzu kol

Blok přední náprava a blok zadní náprava představuje zbylé dva regulátory prokluzu pro přední a pro zadní nápravu.

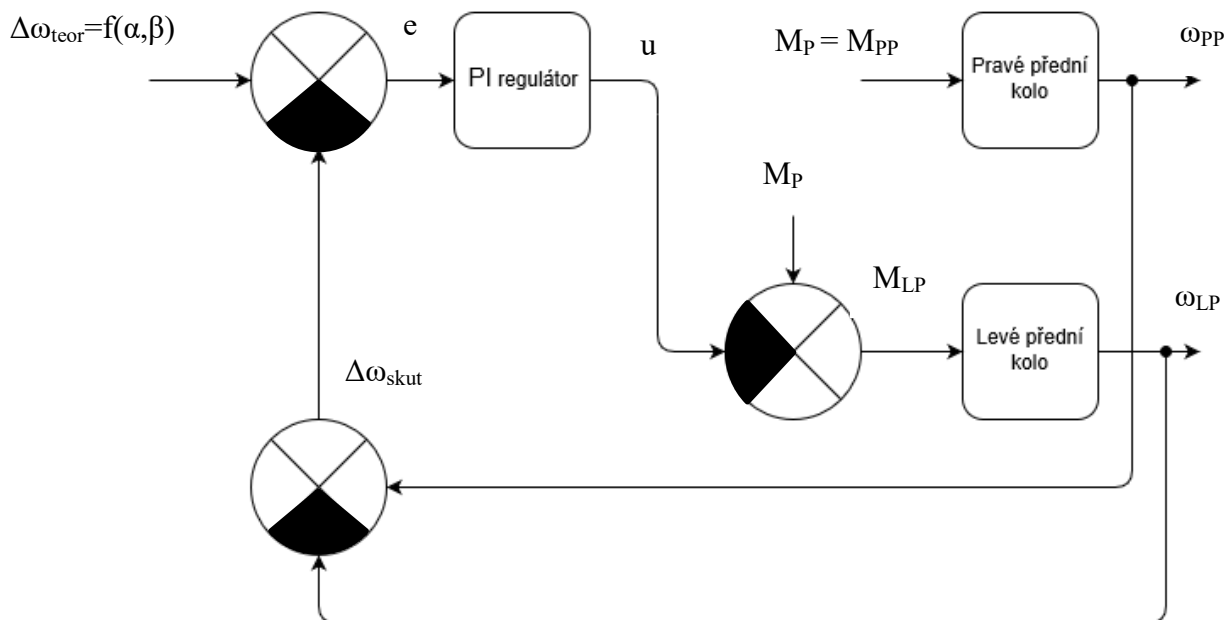
Tyto regulátory mají totožný princip funkce. Porovnávají rychlosti kol na pravé a levé straně vozidla. Pokud je rozdíl těchto rychlostí jiný, než jaký je teoreticky spočítaný rozdíl rychlostí v závislosti na úhlu natočení řídicích kol, vytváří akční zásah. Tento akční zásah je v porovnání s mezinápravovým regulátorem distribuovaný pouze na kolo, které ztratilo adhezi, to znamená, že je snížen moment. Hnací síla nemůže být zvyšována na druhém kole z důvodu ztráty směrové stability. To znamená, že velikost točivého momentu vypočtena mezinápravovým regulátorem prokluzu je přímo distribuována na neprokluzující kolo, zatímco na kole prokluzujícím je točivý moment snížen na takovou úroveň, při které nedochází k prokluzu.

V případě, že není prokluz kola identifikován, je na obě kola na nápravě distribuován moment vypočtený mezinápravovým regulátorem prokluzu.



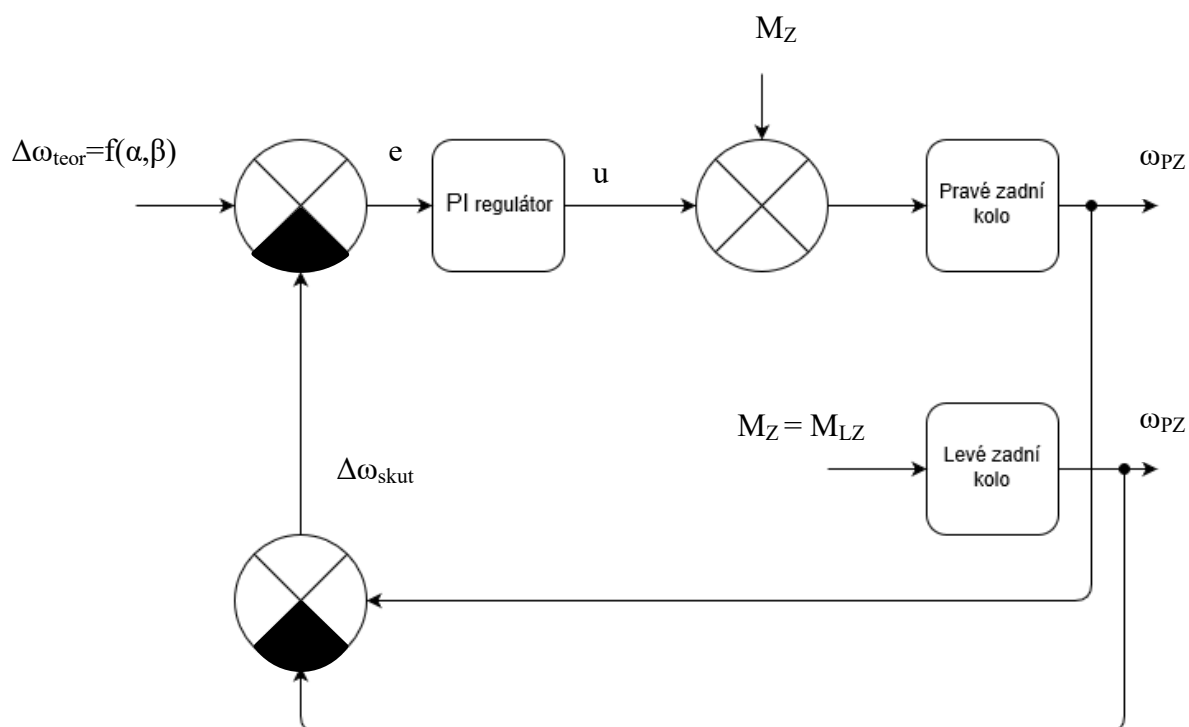
Obr. 14- Blokové schéma regulátoru prokluzu pro prokluz pravého předního kola

Akční zásah je vypočítáván a následně distribuován v závislosti na prokluzujícím kole pouze na kolo kde je potřeba omezit točivý moment.

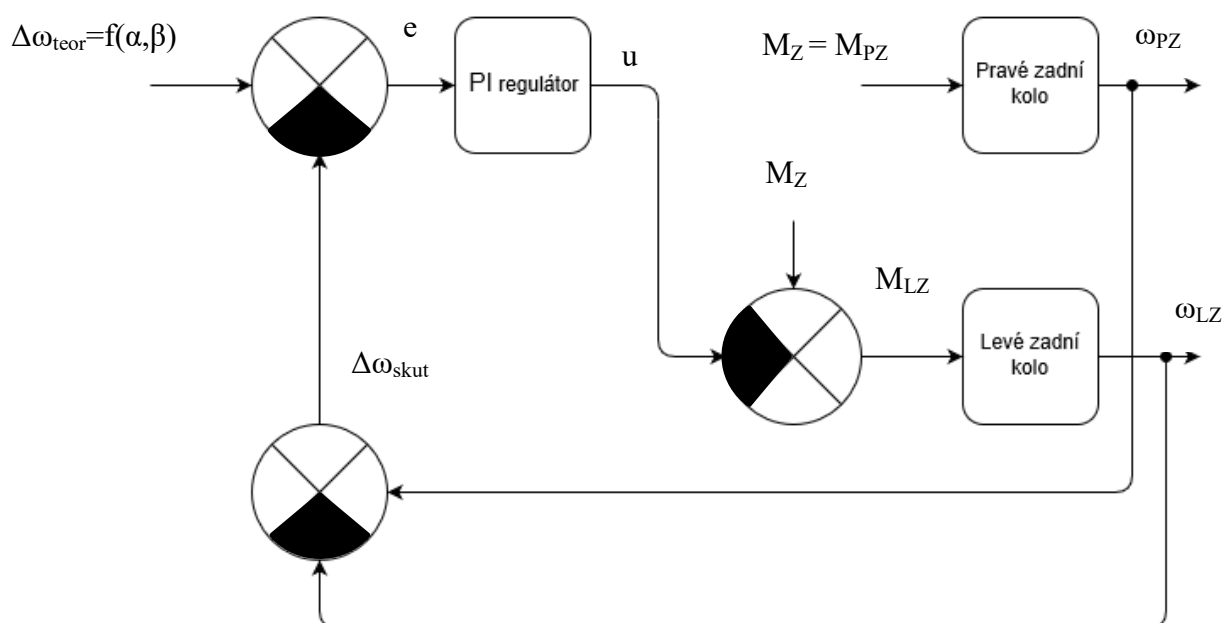


Obr. 15 - Blokové schéma regulátoru prokluzu pro prokluz levého předního kola

Rozdělení momentu na zadní nápravě funguje na stejném principu. Velikost momentu je omezována pouze na prokluzujícím kole.

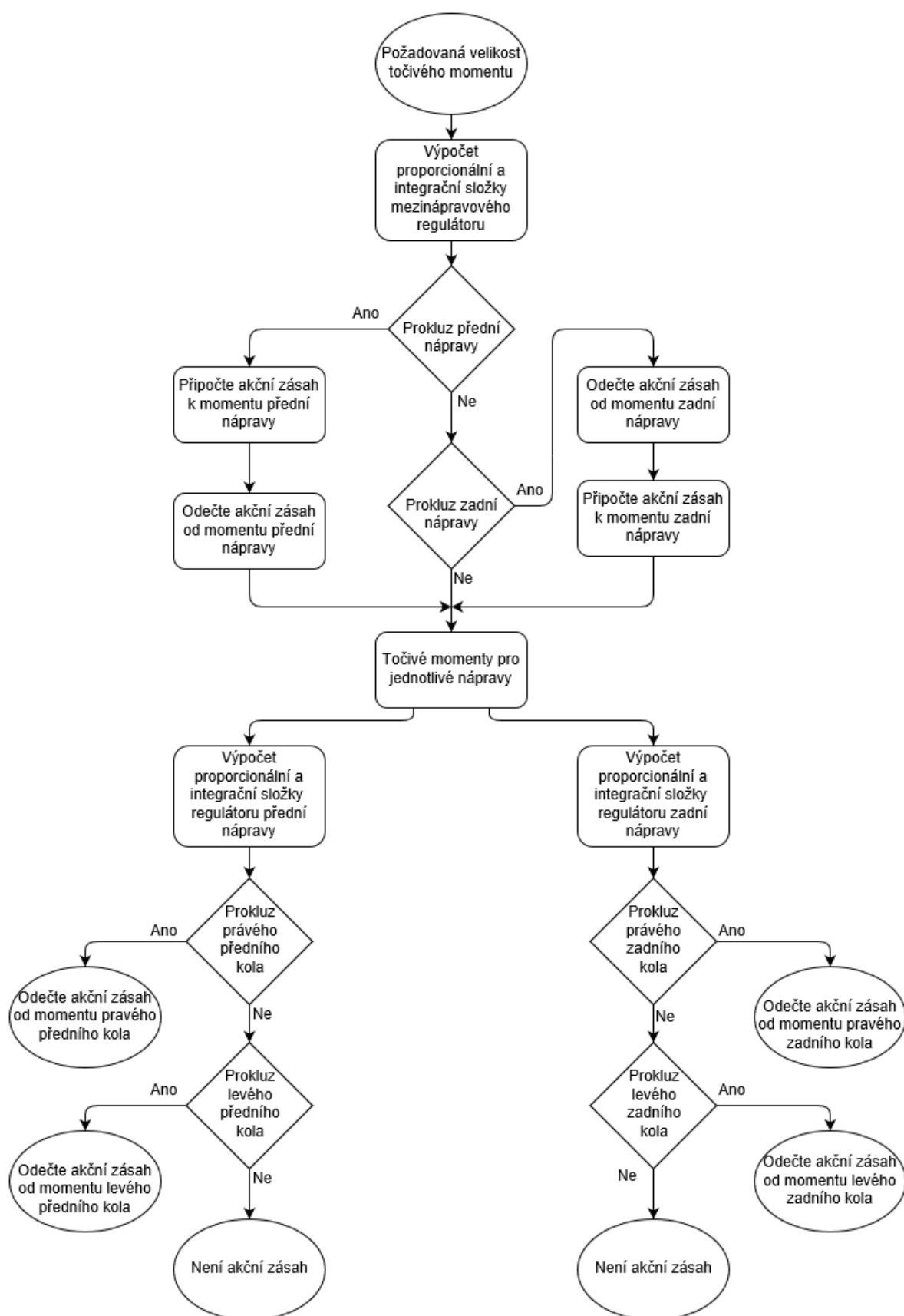


Obr. 16- Blokové schéma regulátoru prokluzu pro prokluz pravého zadního kola



Obr. 17- Blokové schéma regulátoru prokluzu pro prokluz levého zadního kola

Způsob výpočtu a distribuce regulačních zásahů je dán následujícím algoritmem na obrázku 18.



Obr. 18 - Vývojový diagram protiprokluzového systému

Nebyla provedena identifikace regulovaných systému a nastavení regulátoru bylo provedeno experimentálně, tak aby bylo možno ověřit činnost celého systému. Přesné

nastavení regulátoru, tak aby bylo dosaženo dobrých jízdních vlastností vozidla, bude součástí řešení některé z budoucí disertační nebo diplomové práce.

Druhá část systému vychází z předpokladu, že nesmí být překročeno maximální zrychlení vozidla. Pokud dojde k prokluzu všech kol, první navržený systém by byl nefunkční, protože rychlosti všech kol by byly stejné. Proto byl vytvořen sekundární systém sledující maximální zrychlení. Maximální zrychlení vozidla je stanoveno jako:

$$a_{max} = \frac{F_x}{m_v} \quad (36)$$

Hnací síla na kolech je vypočítána z maximálních točivých momentů motorů, kdy jeden motor poskytuje až 84 Nm.

$$F_x = \frac{M_k}{r_k} \cdot i \quad (37)$$

$$F_x = \frac{84}{0,63} \cdot 4 \quad (38)$$

$$F_x = 533,33 [N] \quad (39)$$

Hmotnost vozidla DEMOCAR je stanovena v současné době na 350 kg. Po dosazení do vzorce (36), je získáno:

$$a_{max} = \frac{4 \cdot 533,33}{350} \quad (40)$$

$$a_{max} = 6,0952 [m \cdot s^{-2}] \quad (41)$$

Je předpoklad, že pokud je zrychlení na kolech větší, než je maximální stanovené, dochází ke ztrátě adhezní síly kol s vozovkou. Aktuální zrychlení vozidla je vypočítáno následujícím způsobem:

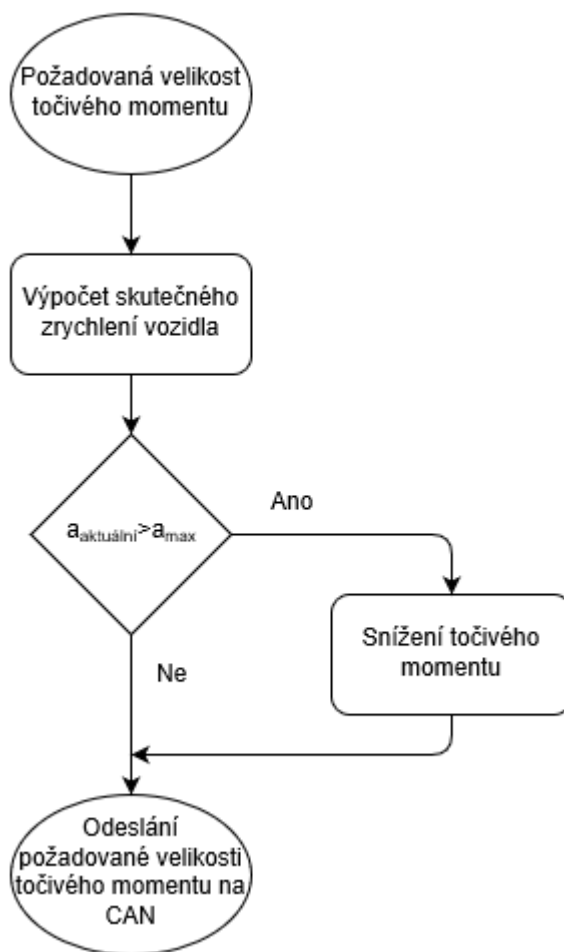
$$a_{aktuální} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (42)$$

Kde:

$\Delta v$  ... rozdíl mezi rychlostí aktuální a předchozí přijatou,

$\Delta t$  ... doba mezi příjmem zpráv na CAN sběrnici obsahující rychlosti.

V případě překročení maximálního zrychlení dojde ke snížení točivého momentu na všech kolech.



Obr. 19 - Vývojový diagram - omezení točivého momentu v závislosti na zrychlení

#### 4.6 Vzájemná komunikace a bezpečnost

Základní komunikace mezi jednotkami probíhá po sběrnici CAN, rychlostí 1 Mbit/s, kdy jsou propojeny všechny jednotky nacházející se na vozidle. Jednotka DCU posílá na sběrnici informace o rychlosti vozidla a stavu pohonu.

Tabulka 3 - data posílané jednotkou DCU

	ID	Hodnota 1. byte	Hodnota 2. byte	Hodnota 3.byte	Hodnota 4. byte	Hodnota 5.-8. byte
Rychlost	150	123	0	0	0	-1000 až 1000
Stav	150	0	0	0	120/0	0

Pro funkci pohonu a funkci algoritmu řízení je potřeba přijmout informace z ostatních elektronických jednotek. Primárně se jedná o informaci zapnutí/vypnutí pohonu

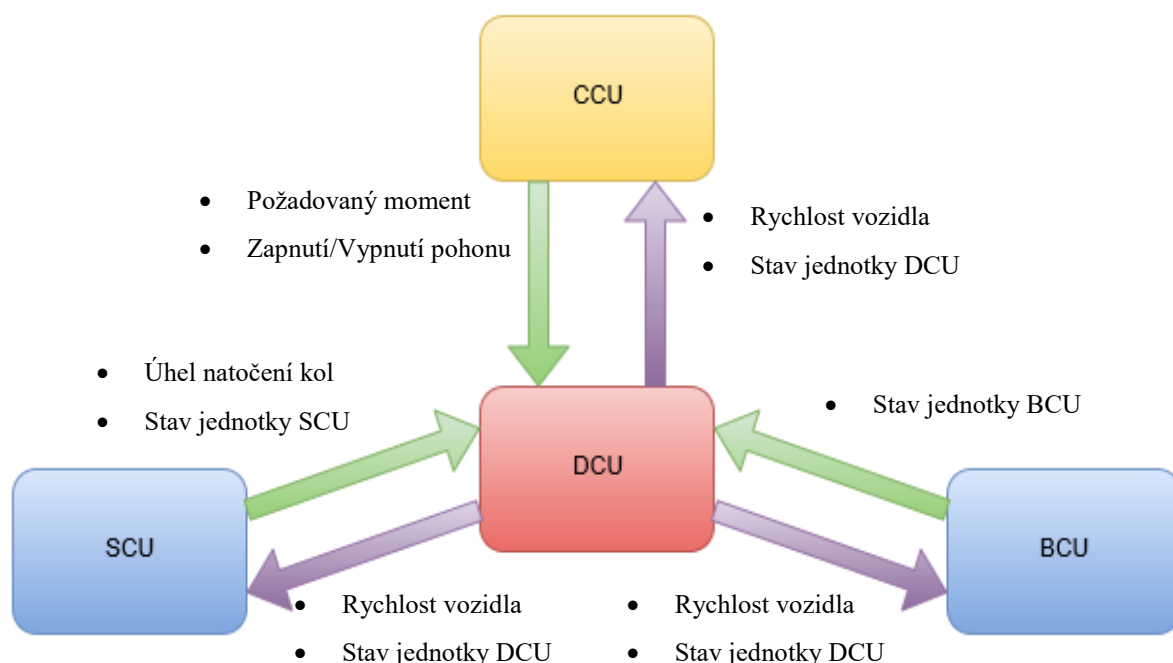


a požadovaného točivého momentu od vysílačky, kterou zprostředkovává jednotka CCU. Dále jde o informaci o natočení řídicích kol od jednotky SCU a informaci od stavu brzdového systému jednotky BCU.

*Tabulka 4 - data přijímané jednotkou DCU*

	ID	Hodnota 1. byte	Hodnota 2. byte	Hodnota 3.byte	Hodnota 4. byte	Hodnota 5.-8. byte
<b>Zapnutí/Vypnutí</b>	100	0	0	0	0	8 <sub>hex</sub> (zapnuto)
<b>Požadovaný moment</b>	100	0	0	-4000 až 4000		0
<b>Natočení kol</b>	780	-380 až 380		0	0	0
<b>Stav řízení</b>	780	0	0	0	120/0	0
<b>Stav brzd</b>	140	0	0	0	120/0	0

Vzájemná komunikace mezi jednotkami, které se přímo podílejí na ovládání samotného vozidla, je znázorněná na obrázku 20.



*Obr. 20 - Vzájemná komunikace mezi jednotkami ovládající vozidlo DEMOCAR*

V případě, že jednotka SCU nebo BCU odešle chybový stav, znamenající závadu. Je nastaven také chybový stav v jednotce DCU. Tento chybový stav vyvolá odpovídající reakci v závislosti na konkrétní jednotce tak, jak je popsáno v následujícím textu.

Dále je potřeba stanovit bezpečnostní hrozby a předpokládané problémy na celém systému. Tyto hrozby mohou být mechanického, elektrického, popřípadě chemického charakteru. Do seznamu předpokládaných rizik patří níže uvedené:

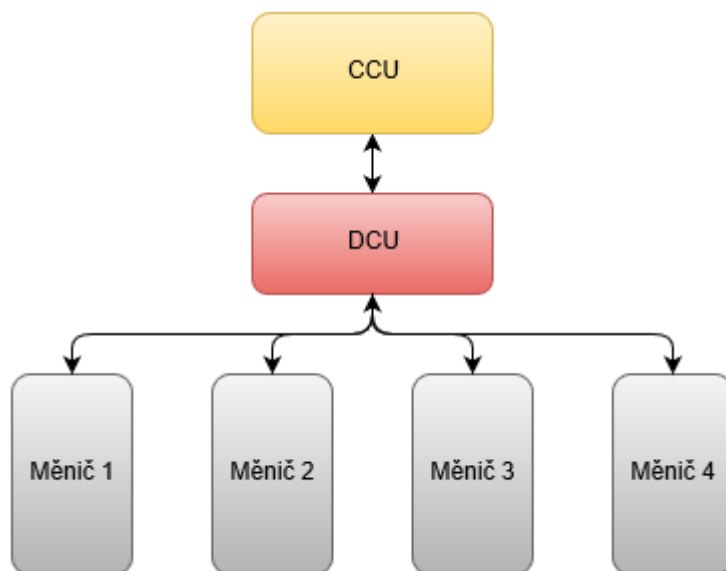
- Ztráta komunikace mezi dálkovým ovládáním a vozidlem
- Ztráta komunikace mezi jednotkami
- Ztráta komunikace mezi jednotkou DCU a frekvenčními měniči
- Závada na brzdovém systému
- Závada na systému servořízení vozidla
- Poškození frekvenčních měničů
  - Vznikne chyba z důvodu přepětí meziobvodu
  - Chyba z důvodu zablokování měničů
  - Elektrické poškození měničů, zkrat
- Elektrické poškození elektrických motorů
- Přepětí nebo podpětí baterie
- Mechanické poškození motorů
- Mechanické poškození převodového ústrojí

Mezi nejméně závažné rizika patří rizika mechanického charakteru, kdy se předpokládá zásah obsluhy, za předpokladu, že vozidlo zůstane plně směrově řiditelné. Tyto rizika mohou být v určitých případech eliminována vlastní vnitřní diagnostikou měničů, která může vyhodnotit například zablokování hřídele motoru, a následně dojde ke vzniku chyby měniče.

Mezi závažnější rizika patří chyby na systému servořízení a na brzdovém systému. Pokud dojde k neočekávané závadě na jednom z těchto systémů, je potřeba zastavit vozidlo dříve, než vzejde požadavek na zastavení od obsluhy vozidla. V praxi to znamená, že pokud dojde k závadě na systému servořízení, dojde k deaktivaci pohonu (to znamená nastavení nulového točivého momentu) a plnému brždění. Pokud dojde k závadě na jednotce BCU, dojde také k deaktivaci pohonu, a k aktivaci nouzové brzdy.

Nejzávažnější rizika představuje ztráta kontaktu obsluhy s vozidlem. Což znamená, že v případě ztráty komunikace po sběrnici CAN by nebylo možné vozidlo ovládat. Problém je také skutečnost, že v případě ztráty komunikace zůstává poslední uložená hodnota v DCU stále aktivní. Pokud byla poslední přijatá zpráva s požadavkem na maximální velikost točivého momentu, poté by nebylo možno zastavit vozidlo, které by pokračovalo

v pohybu. Podobný případ může nastat v případě, že dojde ke ztrátě komunikace s frekvenčními měniči. V tomto případě zůstává ve frekvenčních měničích uložená poslední hodnota. Z hlediska jednotky DCU je potřeba sledovat 5 zařízení připojených na CAN tak jak je na obrázku 21.

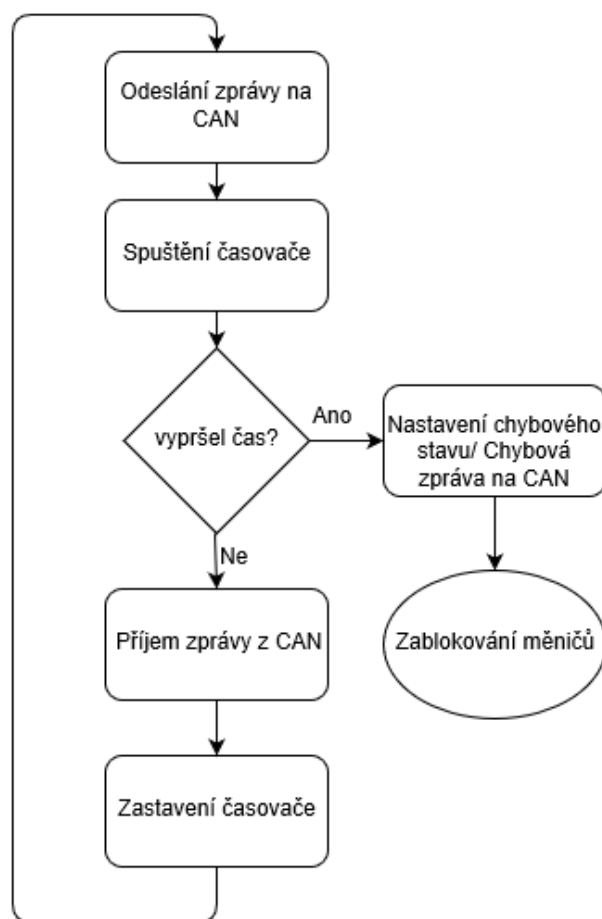


*Obr. 21 - Připojení jednotky DCU přes sběrnici CAN*

Princip kontroly komunikace spočívá ve sledování ISR (událost, přerušení), kdy v okamžiku odeslání zprávy po sběrnici se použít časovač, který odpočítává předem stanovený čas. Pokud je přijata zpráva po sběrnici, dojde k resetování časovače. Toto se cyklicky opakuje. Pokud není přijata zpráva, časovač vyprší, je zavolána funkce, která vyvolá v běhu programu chybový stav.

Chybový stav vyvolává následující akci:

- Vypnutí měničů, nulový točivý moment
- Odeslání chyby ostatním řídicím jednotkám



Obr. 22- Kontrola komunikace na sběrnici CAN

Doba mezi odesláním a příjmem zprávy byla změřena pomoci zařízení PP2CAN, které umožňuje analýzu zpráv na sběrnici. Tak jak je možné vidět na obrázku 23, kde zpráva číslo 3920 je zpráva dotazující se na rychlost motoru a zpráva číslo 3921 je odpověď, je doba mezi odesláním a přijetím zprávy 2 ms. Na základě této informace je možné stanovit dobu vypršení časovače.

Nu...	Received time	Type	Id 1	Id 2	Bytes	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	Port
3924	16:41:7.637:0.00	St	1541		8	35	148	68	0	20	0	0	0	1
3923	16:41:7.615:0.00	St	1539		8	64	97	65	0	0	0	0	0	1
3922	16:41:7.602:0.00	St	1540		8	64	97	65	0	0	0	0	0	1
3921	16:41:7.594:0.00	St	1414		8	67	97	65	0	176	176	234	255	1
3920	16:41:7.592:0.00	St	1542		8	64	97	65	0	0	0	0	0	1
3919	16:41:7.584:0.00	St	1413		8	67	97	65	0	136	79	10	0	1
3918	16:41:7.582:0.00	St	1541		8	64	97	65	0	0	0	0	0	1
3917	16:41:7.575:0.00	St	1539		8	35	12	68	0	0	0	0	0	1
3916	16:41:7.562:0.00	St	1540		8	35	12	68	0	1	0	0	0	1
3915	16:41:7.554:0.00	St	1414		8	96	12	68	0	0	0	0	0	1
3914	16:41:7.552:0.00	St	1542		8	35	12	68	0	1	0	0	0	1
3913	16:41:7.544:0.00	St	1413		8	96	12	68	0	0	0	0	0	1
3912	16:41:7.542:0.00	St	1541		8	35	12	68	0	0	0	0	0	1

Obr. 23 - Zprávy na CAN sběrnici

V případě vzniku závady na hlavní CAN sběrnici, dojde k zablokování měničů a nastavení nulového točivého momentu, protože v tento okamžik dochází k plnému nouzovému brždění. Nouzové brždění je vyvoláno jednotkou BCU na základě jejích vlastních kontrolních algoritmů. V případě, ztráty napájení je využita nouzová brzda.

V případě vzniku závady na sběrnici CANopen, která zprostředkovává komunikaci s frekvenčními měniči, není možné zadávat nové příkazy na požadovanou rychlost a točivý moment. V ŘJ frekvenčních měničů zůstávají poslední hodnoty parametrů, které byly přijaty. V tento moment je potřeba odeslat požadavek na plné brždění. Dále je potřeba odpojit napájecí napětí 540V skrze relé X (sloužící k připojení hlavního battery packu), čímž dojde k deaktivaci měničů a zrušení hnací síly.

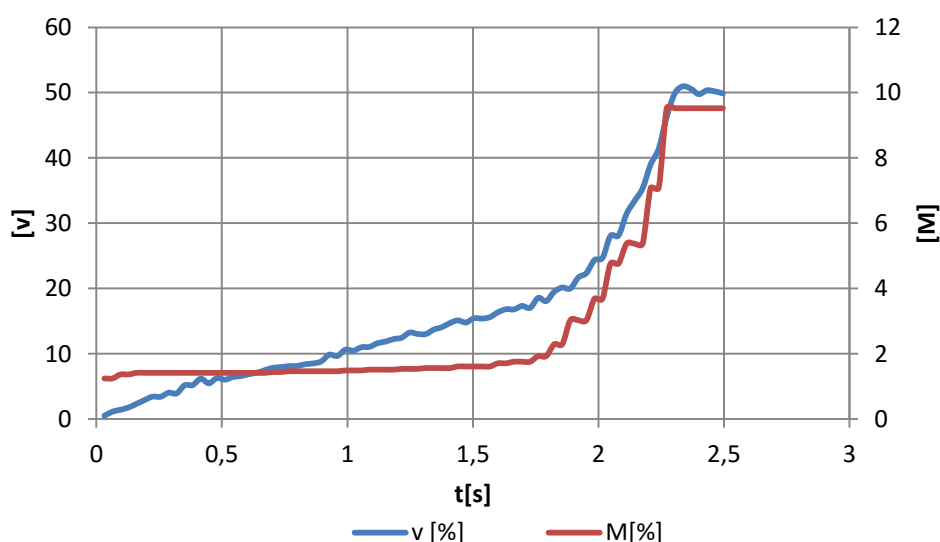
V případě vzniku závady je potřeba tuto závadu odstranit, vypnout a znovu zapnout pohon pomocí páčky na vysílače, a vozidlo je opět připraveno k provozu.

## 5. Ověření vlastností a funkčnosti systémů

Vlastnosti a funkčnost navrženého řízení pohonu bylo otestováno na válcové dynamické zkušebně. Byly provedeny testy a ověření ověřující chování samotného ovládání točivého momentu a testy ověřující chování diferenciálu a protiprokluzového systému.

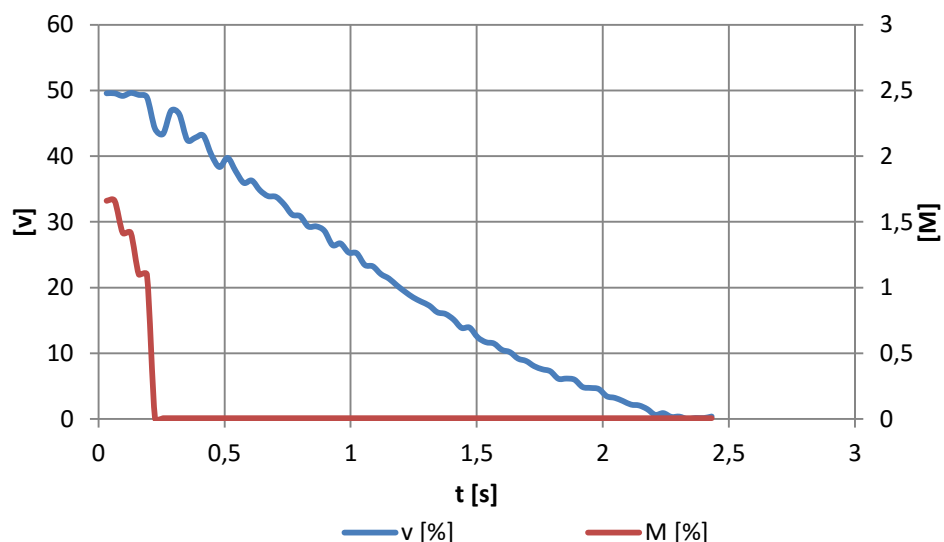
### 5.1 Ověření funkčnosti pohonu

Pro samotné ověření funkčnosti pohonu byly měřeny charakteristiky rychlosti a točivého momentu, při akceleraci a deceleraci. Měření bylo prováděno v prostředí ProDrive, které umožňuje zobrazení všech parametrů frekvenčních měničů Baumüller.



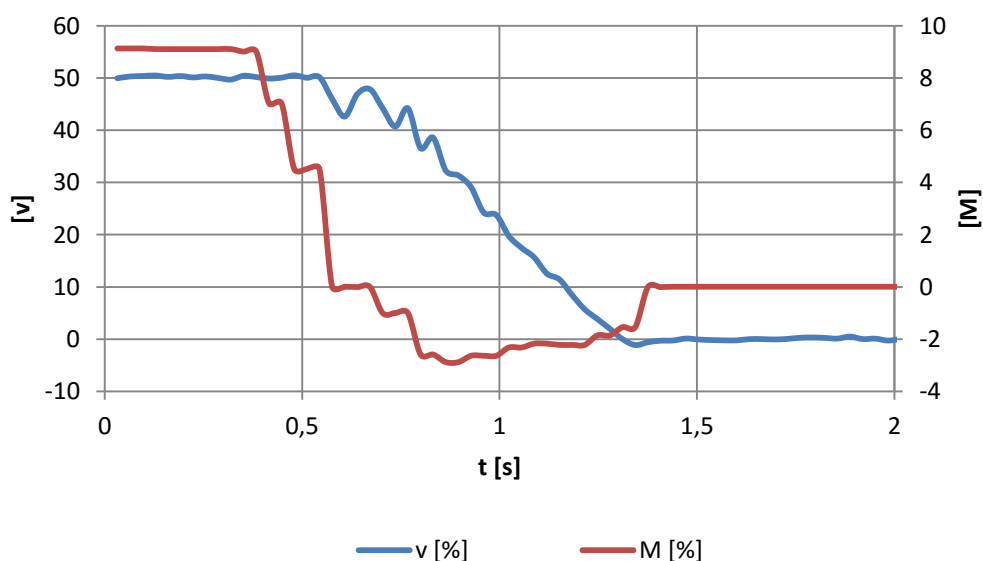
Obr. 24 – Průběh akcelerace vozidla

Na obrázku 24 je průběh rychlosti během akcelerace vozidla s postupným nárůstem točivého momentu. Rychlost je omezena regulátorem rychlosti na 50 %. Na obrázku 25 je průběh při doběhu kola, bez brzdného zásahu.



Obr. 25 - Průběh volné decelerace vozidla

Na následujícím obrázku dochází k brždění kola s využitím brzdného momentu. Moment postupně klesá až do záporných hodnot, a vytváří brzdnu sílu.



Obr. 26 - Průběhu brždění vozidla

## 5.2 Ověření funkčnosti výpočtu koeficientů pro diferenciál

Ověření funkčnosti výpočtu koeficientů pro diferenciál bylo provedeno na základě porovnání hodnot, které jsou vypočteny řídicí jednotkou. Konkrétně se jedná o parametry maximální rychlosti, které v případě natočení kol nabývají různých hodnot jak je možno vidět na obrázku níže.

Name	Value	Location
steer_angle	0.0	0x400012b8\Virtual
Speed_Value_Max_1	1073741824	0x40001194\Virtual
Speed_Value_Max_2	-1073741824	0x40001198\Virtual
Speed_Value_Max_3	1073741824	0x4000119c\Virtual
Speed_Value_Max_4	-1073741824	0x400011a0\Virtual
act_torque_m1	14792	0x40001290\Virtual
act_torque_m2	14792	0x40001294\Virtual
act_torque_m3	14792	0x40001298\Virtual
act_torque_m4	14792	0x4000129c\Virtual
trqw	14792	0x4000131c\Virtual
Torque_Want	3694	0x400012b0\Virtual

Obr. 27 - Parametry a jejich hodnoty při přímé jízdě vpřed

Parametry *Speed\_Value\_Max* představují maximální rychlost jednotlivých kol. Záporná hodnota znamená, že se jedná o kolo na druhé straně vozidla, které se musí točit v opačném smyslu otáčení z důvodu mechanického řešení umístění motorů a převodovek. Stejně jako omezení točivého momentu *act\_torque* jsou hodnoty parametru pro jízdu vpřed v absolutní hodnotě stejně velké. Parametr *steer\_angle* představuje natočení řídících kol v radiánech.

Na následujícím obrázku je stav kdy vozidlo zatáčí doprava. Index označení kola je:

- 1 – pravé přední,
- 2 – levé přední,
- 3 – pravé zadní,
- 4 – levé zadní.

Name	Value	Location
steer_angle	-0.581745706666667	0x400012b8\Virtual
Speed_Value_Max_1	413547986	0x40001194\Virtual
Speed_Value_Max_2	-536870910	0x40001198\Virtual
Speed_Value_Max_3	345521281	0x4000119c\Virtual
Speed_Value_Max_4	-486408668	0x400011a0\Virtual
act_torque_m1	14792	0x40001290\Virtual
act_torque_m2	14792	0x40001294\Virtual
act_torque_m3	14792	0x40001298\Virtual
act_torque_m4	14792	0x4000129c\Virtual
trqw	14792	0x4000131c\Virtual
Torque_Want	3698	0x400012b0\Virtual

Obr. 28 - Parametry a jejich hodnoty při jízdě doprava

Podle velikosti maximálně dosažitelných rychlostí lze ověřit funkčnost výpočtu koeficientů pro diferenciál, kdy je patrné, že levé přední kolo se pohybuje po nejdelší



dráze, tím pádem se musí pohybovat nejrychleji. Nejkratší dráhu urazí pravé zadní kolo, proto se musí pohybovat nejpomaleji. Toto potvrzuje předpoklad podle obrázku 10. Dále lze ověřit stejným způsobem stav, kdy vozidlo odbočuje doleva.

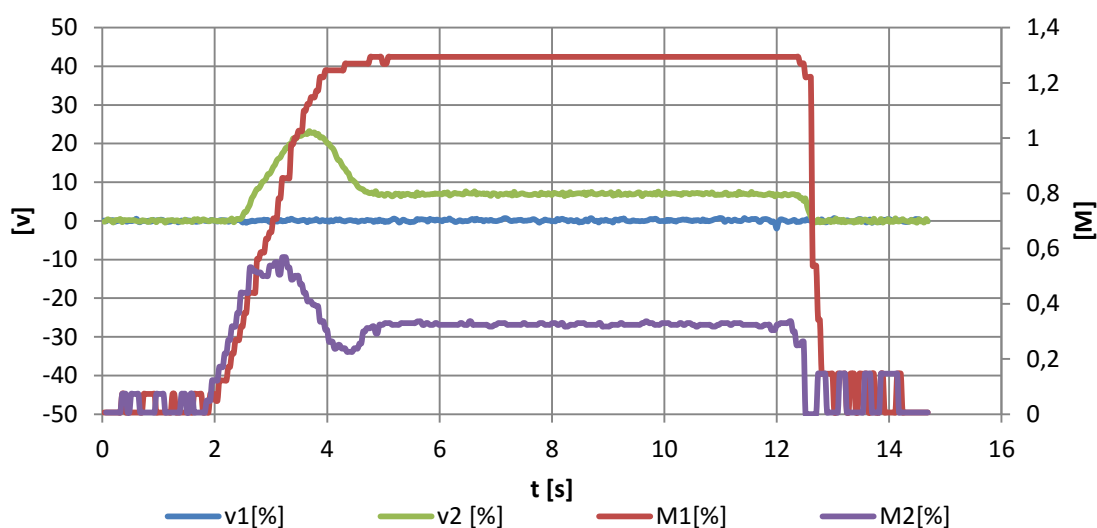
Name	Value	Location
steer_angle	0.6428951133333333	0x400012b8"Virtual
Speed_Value_Max_1	536870910	0x40001194"Virtual
Speed_Value_Max_2	-407804346	0x40001198"Virtual
Speed_Value_Max_3	477972307	0x4000119c"Virtual
Speed_Value_Max_4	-326391693	0x400011a0"Virtual
act_torque_m1	14964	0x40001290"Virtual
act_torque_m2	14964	0x40001294"Virtual
act_torque_m3	14964	0x40001298"Virtual
act_torque_m4	14964	0x4000129c"Virtual
trqw	14964	0x4000131c"Virtual
Torque_Want	3741	0x400012b0"Virtual

Obr. 29 - Parametry a jejich hodnoty při jízdě doleva

Je důležité si všimnout, že velikost omezení točivého momentu je pro všechny kola stejná. To je v případě, že není akční zásah protiprokluzového systému, a pneumatiky mají dostatečnou adhezi. Velikost točivého momentu má být stejně velká pro všechna kola, zatímco jejich rychlosti se budou při průjezdu zatáčkou lišit.

### 5.3 Ověření funkčnosti protiprokluzového systému

Ověření probíhalo v laboratorním prostředí, bez možnosti zatížení v reálných podmínkách z důvodu poškození převodovek vozidla. Byly zatěžovány hřídele motorů vnější silou, a změnou zatížení hřídelí byly simulovány podmínky prokluzu kol.



Obr. 30 - Ověření proti-prokluzového systému

Na obrázku 29 je charakteristika rychlosti prokluzu jednoho kola. Kolo 1 bylo zatěžováno silou tak aby nedocházelo k jeho otáčení. Kolo 2 bylo uvolněno, čímž je simulován prokluz. Po nárůstu rychlosti  $v_2$  dojde ke snížení točivého momentu  $M_2$ . Rychlost  $v_2$  by se měla v praxi ustálit na nule, bohužel podmínky měření a nastavení regulátoru toto nedovolují. Proto vzniká regulační odchylka.

Rychlost i točivý moment je udáván v procentech z maximálního možného rozsahu. Charakteristika jednoho a druhého kola je na časové ose mírně posunutá z důvodu využití dvou počítačů pro měření jedno a pro měření druhého kola, kdy nebylo možné synchronizovat úplně přesně začátek měření.

## 6. Závěr

Diplomová práce se zabývá návrhem řídicího algoritmu pro řízení elektrického pohonu 4WD vozidla Democar s respektováním požadavků funkční bezpečnosti a vzájemné spolupráce několika vyvíjených systémů. V rámci řešení byl proveden rozbor všech systému na vozidle právě s ohledem na spolupráci s jednotkou DCU. Na základě rozboru funkce jednotlivých systému podílejících se na ovládání vozidla byly stanoveny požadavky na komunikaci jednotek, bezpečnost a redundanci jednotlivých systémů vozidla. Dále byly analyzovány vlastnosti pohonu, které se odvíjí od mechanických charakteristik elektrických motorů Baumüller. To znamená jejich výkon, momentová zatížitelnost a podobně. Dále byly analyzovány možnosti frekvenčních měničů Baumüller, možnosti jejich parametrování, komunikace s ŘJ, rekuperace apod.

Další část práce se zabývá návrhem přestavby vozidla na pohon 4WD, uložením frekvenčních měničů, uložením motorů a převodovek a použité kabeláže. Dále bylo potřeba konfigurace CAN modulů u nepoužívaných měničů, a úprava aplikačního software pro odesílání parametrů na všechny frekvenční měniče.

Kapitola zabývající se vývojem samotného software obsahuje popis jednotlivých funkčních částí. Bylo potřeba navrhnout způsob řízení měničů. Jedná se o rychlostní řízení, přičemž je omezován točivý moment. Je nastaven požadavek na rychlost v daném smyslu otáčení výstupní hřídele, což představuje maximální rychlost všech kol a je omezován točivý moment na kolech podle požadavků řidiče, čímž může řidič průběžně regulovat rychlost vozidla. Maximální rychlost jednotlivých kol navíc závisí na natočení řídicích kol. Toto řešení provedení elektronického diferenciálu neustále přizpůsobuje rychlost kol pro hladký průjezd zatáčkou. Dále byl vyvinut protiprokluzový systém, který neustále sleduje rychlosti a zrychlení všech kol a v případě, že vyhodnotí ztrátu adheze na některém z kol, dojde k regulaci točivého momentu. Regulační zásah je upravován PI regulátorem.

Byl proveden rozbor požadavku na komunikace mezi systémy, kdy hlavní částí je oblast bezpečnosti. V případě, že dojde k poškození nebo závadě na některém ze systému, je potřeba provést odpovídající akční zásah. Dále je potřeba sledovat funkci samotné komunikace mezi systémy, a v případě chyby opět provést odpovídající zásah, tak jak je popsáno v práci.

Poslední část práce obsahuje výsledky experimentálního ověřování funkčnosti pohonu na vozidle. V rané fázi experimentálních testů bohužel došlo k nevratné destrukci obou předních převodovek a další testy byly na příkaz vedoucího diplomové práce zastaveny.

## 7. Seznam použité literatury a zdrojů

1. **Kováč, J.** *Diplomová práce, Návrh a realizace systému servořízení demonstračního vozidla.* Ostrava : VŠB-TUO, 2014.
2. Historie elektromobilismu. *Elektromobil.vseznamu.cz.* [Online] 2010. [Citace: 05. 03 2016.] <http://elektromobil.vseznamu.cz/historie-elektromobilismu>.
3. **Cáb, L.** *Dipomová práce, Návrh a realizace řídicí jednotky pohonu demonstračního vozidla Democar.* Ostrava : VŠB-TUO, 2015.
4. **BAUMÜLLER NÜRNBERG GmbH.** *Three phase synchronous motors: DSC 45-100 540V.* Německo : BAUMÜLLER NÜRNBERG GmbH, 2008.
5. MQX operační systémy. *nxp.com.* [Online] 2016. [Citace: 07. 04 2016.] <http://www.nxp.com>.
6. **Osička, J.** *Diplomová práce, Technologie vnitřní a uživatelské diagnostiky demonstračního vozidla s elektrickým pohonem Democar.* Ostrava : VŠB-TUO, 2015.
7. **BAUMÜLLER NÜRNBERG GmbH.** *BM4-0-CAN-03: CANopen-Slave for bmaxx Application manual.* Německo : BAUMÜLLER NÜRNBERG GmbH, 2005.
8. **Vlk, F.** *Dynamika motorových vozidel.* Brno : Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2003. ISBN 80-239-0024-2.
9. **BAUMÜLLER NÜRNBERG GmbH.** *B MAXX BM 4400, BM4600, BM4700: Basic unit.* Německo : BAUMÜLLER NÜRNBERG GmbH, 2011.
10. **Przeczek, S.** *Diplomová práce, Sestavení funkční koncepce a vývoj aplikačního software elektrohydraulického systému brzd elektromobilu Democar.* Ostrava : VŠB - TUO , 2016.
11. **Dulanský, D.** *Diplomová práce, Sestavení funkční koncepce a vývoj aplikačního software elektronického systému servořízení elektromobilu democar.* Ostrava : VŠB - TUO , 2016.
12. **Jarolím, A.** *Diplomová práce, Návrh a praktická realizace koncepce managmentu napájení vozidla s elektrickým pohonem Democar.* Ostrava : VŠB - TUO , 2016.
13. **Vlk, F.** *Podvozky motorových vozidel.* Brno : Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006. ISBN 80-239-6464-2.

